

阿拉伯聚糖结构及活性研究进展

刘闪闪^{1,2}, 李俊慧^{1,2}, 韦朝阳^{1,2}, 李珊^{1,2}, 叶兴乾^{1,2}, 陈士国^{1,2,*}

(1.浙江省农产品加工技术研究重点实验室 浙江杭州 310029;

2.浙江大学生物系统工程与食品科学学院 浙江杭州 310029)

摘要: 阿拉伯聚糖主要是由阿拉伯糖单元组成的低聚物,在植物的种子、果实、叶子、茎秆、根部的细胞壁中广泛存在,但不同来源的阿拉伯聚糖结构差异性较大。阿拉伯聚糖具有改善肠道微生态及有益菌、增强机体免疫力等活性,可用于生产功能性产品。本文介绍了阿拉伯聚糖的结构及主要生物活性方面的国内外研究进展,并对其研究开发进行展望。

关键词: 阿拉伯聚糖 结构 活性

Research of structure and activity of Arabinans

LIU Shan-shan^{1,2}, LI Jun-hui^{1,2}, WEI Chao-yang^{1,2}, LI Shan^{1,2}, YE Xing-qian^{1,2}, CHEN Shi-guo^{1,2,*}

(1.Zhejiang Key Laboratory for Agro-Food Processing ,Hangzhou 310029 ,China;

2.College of Biosystems Engineering and Food Science Zhejiang University ,Hangzhou 310029 ,China)

Abstract: Arabinans are mainly composed of arabinose units ,which are widely found in the cell wall of plants seeds ,fruits , leaves ,stems and roots.However ,the structure differences of arabinans from different sources huge.Arabinans show the activity of improving the intestinal microecosystem and beneficial bacterium and enhancing the immunity of the organism ,so they can be used as functional food ingredients.This review introduces the research of structure and activity of arabinans.Meanwhile ,the future research development is forecasted.

Key words: Arabinans; structure; activity

中图分类号: TS241

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)09-0391-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.067

植物多糖作为一种天然的活性物质,具有来源广泛,毒副作用小,原料成本低等优点,因此一直是科学研究中的热点。多糖除了作为植物的贮藏养料和骨架成分外,还具有抗肿瘤、抗心血管疾病、预防衰老、促进有益菌增殖^[1]、提高人体免疫力^[2]等生理活性。常见的植物多糖包括枸杞多糖、魔芋甘露聚糖、海藻多糖、果胶等。阿拉伯聚糖是一种以 α -L-阿拉伯呋喃为主要单糖组成的植物性多糖,分子量一般为8.4~10000 ku,其通过 $\alpha(1 \rightarrow 5)$ 糖苷键形成主链,可在O-3或O-2发生单取代或者双取代,取代基可以是阿拉伯单糖、二糖、三糖等短链,也可以是阿魏酸、葡萄糖等。以阿魏酸为取代基取代后形成的产物为单聚体,通过阿魏酸间的氧化耦合作用则形成双聚体,后者和植物维持细胞壁柔韧性有重要关系。阿拉伯聚糖一般连接在RG-I上,可以形成空间位阻导致同聚半乳糖醛酸(Galacturonic acid, HGA)不能靠近形成刚性结构,而刚性结构一旦形成,细胞便不能通过变形缓解细胞吸水膨胀时对胞壁产生的压力^[3]。

研究表明,通过化学、物理和酶法作用于植物的不同部位,可以得到各类阿拉伯聚糖。而不同来源的阿拉伯聚糖,其结构因植物部位的不同而有差异,即使是同一植物,其结构也随生长的不同阶段而有所不同,由此可见其结构复杂。目前报道出来的阿拉伯聚糖或者富含阿拉伯聚糖的糖并不常见,其中生物活性主要集中在益生元效应^[4]、胃保护活性、抗菌等,因此以下主要对报道出来的阿拉伯聚糖结构及活性研究进展进行综合性概述,以为阿拉伯聚糖新颖结构、独特生理活性的探索以及在乳制品、谷物制品、糖果、饮料、保健产品的开发利用提供理论指导。

1 阿拉伯聚糖的结构研究

糖结构复杂多样,鲜有共同的结构特征,阿拉伯聚糖也不例外。一般而言,除分子量、聚合度差异较大之外,主链连接方式也不同,但以 $(1 \rightarrow 5)$ 为主,少量存在 $(1 \rightarrow 2)$ 。总之在目前的报道中,很难从不同的植物或者部位中发现结构完全一致的阿拉伯

收稿日期: 2016-10-24

作者简介: 刘闪闪(1993-),女,硕士研究生,研究方向:植物多糖及寡糖的活性及利用,E-mail: 879424100@qq.com。

* 通讯作者: 陈士国(1982-),男,博士,副教授,研究方向:海参多糖的活性及利用,植物多糖的活性及利用等,E-mail: chenshiguo210@163.com。

基金项目: 浙江省公益项目(2014C32G2010026)。

聚糖。到现在为止只有 Youssef Habibi 等人^[5]发现了两种植物中存在相同的阿拉伯聚糖。Youssef Habibi 等人通过研究属于同一科的两个品种的植物 (*Schizolobium parahybae*、*S. parahybae*) ,发现这两种植物中都存在两种糖,半乳甘露聚糖以及阿拉伯聚糖。对于半乳甘露聚糖,甘露糖:半乳糖为 3.0:1.0。而对于阿拉伯聚糖而言,都是通过 $\alpha(1\rightarrow5)$ 糖苷键连接的中性的阿拉伯呋喃糖,作者以另一种植物 *Cassia fastuosa* 中的半乳甘露聚糖以及阿拉伯聚糖作为对照说明。Youssef Habibi 等人发现对于半乳甘露聚糖,虽然甘露糖:半乳糖也是 3.0:1.0,但是精细结构和另外两种树木有很大区别。这说明 *Schizolobium parahybae* 以及 *S. parahybae* 是相同的品种。JA Ferreira 等人^[6]发现橄榄的阿拉伯聚糖聚合度和成熟阶段有关。组成阿拉伯聚糖的单糖除了阿拉伯呋喃糖外,也有少部分是吡喃型^[7]。同时除了大部分的单糖单元是 α 异头碳外,橄榄、苹果、火炬松、云杉等植物的阿拉伯聚糖被发现存在 β -Araf 残基^[8-11]。

1.1 种子来源的阿拉伯聚糖

目前研究阿拉伯聚糖最多的植物种子来源有杏仁、豇豆、黄豆、红嘴鹰豆、油菜籽等。N.R.Swamy 等人^[11]从红嘴鹰豆的子叶中分离纯化了两种阿拉伯聚糖,这两种聚糖都是在 O-2、O-3 形成高度分枝的结构,但是不同之处在于其非还原端的构型,其中一种聚糖的非还原端为呋喃型阿拉伯糖,而另外一种聚糖的非还原端则同时存在呋喃型与吡喃型。结构差异导致两种聚糖溶解性不同。Fernando Dourado 等人^[12]从杏仁种子中发现了一种分子量为 762 ku 的多糖,侧链富含阿拉伯聚糖,约占多糖的 70%~80%。通过甲基化方法测出了连接键的类型及比例为 T-Araf: (1 \rightarrow 5)-Araf: (1 \rightarrow 3,5)-Araf: (1 \rightarrow 2,3,5)-Araf = 3:2:1:1。Fernando Dourado 等人^[13]在 *Prunus dulcis* 中也发现了阿拉伯聚糖类似的糖苷键类型及比例,唯一区别是在前者 (1 \rightarrow 3,5)-Araf 的位置,后者则是 (1 \rightarrow 2,5)-Araf。尽管阿拉伯聚糖的主链多以 $\alpha(1\rightarrow5)$ 糖苷键连接而成,但是 Roger Andersson 等人^[14]从油菜籽中分离出的一种水溶性阿拉伯聚糖则以 $\alpha(1\rightarrow2)$ 连接形成主链,丰富了阿拉伯聚糖的结构。

1.2 果实来源的阿拉伯聚糖

植物果实中的糖种类及含量较为丰富,在食品行业、制药行业、化妆品行业中应用较广,因而已经越来越受到人们的重视。Se'bastien 等人^[15]酶解甜菜细胞壁得到了两种阿魏酸酯化了的阿拉伯三糖、阿拉伯四糖。首次发现主链上的两个相近的阿拉伯聚糖可以分别被阿拉伯酸酯化,其中一个发生在被研究报道过的 O-2 位,另一个则发生在非还原端的 O-5 位。甜菜中的阿拉伯聚糖骨架一般由 60~70 个阿拉伯呋喃糖组成,其中一半被取代,90% 发生在 O-3 位,少量的在 O-2 以及 O-3 发生双取代,但是这些取代基一般以呋喃型单糖残基为主。被 2 个阿魏酸酯化了的低聚糖很少见,而发生在 O-5 位的取代更少,约占所有阿魏酸-阿拉伯聚糖酯的 1/40。如

果只有阿拉伯聚糖的非还原端被酯化,则阿魏酸存在果胶的多毛周边区域,这使得阿魏酸易在体内发生氧化耦合反应,从而在细胞壁多糖链之间产生连接,进而控制着细胞壁伸展性和柔韧性等物理性能。橄榄果渣是生产橄榄油过程中的主要废弃物。Susana M.Cardoso 等人^[16]利用 0.02 mol/L 的 HNO₃ 在 80 °C 下处理橄榄渣的酒精不溶部分,得到了一种分子量为 8.4 ku 的阿拉伯聚糖。通过甲基化及 1D、2DNMR 技术分析了糖苷键的组成及比例,分别为 (1 \rightarrow 5)-Araf: T-Araf: 1 \rightarrow 3,5)-Araf: $\alpha(1\rightarrow3)$ -Araf = 5:4:3:1。与一般的聚糖结构相比不同的是,在该聚糖的还原端发现了 β -Araf。Susana M.Cardoso 等人^[17]发现在橄榄果实成熟过程中(绿色、鲜红色、黑色)阿拉伯聚糖的结构发生了显著的变化。和绿色、鲜红色橄榄果相比,黑色橄榄果的果胶多糖具有较多且较短的阿拉伯聚糖侧链,其中这些侧链中又具有较多的 (1 \rightarrow 3,5)-Araf 以及较少的 (1 \rightarrow 3)-Araf。同时发现阿拉伯聚糖链的特征性 T- β -Araf 随着果实的成熟逐渐减少,直至消失。这个特征无疑可被用来估测橄榄果成熟的阶段,同时也可用来表明橄榄果基质中是否含有果胶多糖类物质。

1.3 叶子及茎干来源的阿拉伯聚糖

除了橄榄果中存在 β -Araf 外,Evgeny G. Shakhmatova 等人^[17]通过研究西伯利亚冷杉、火炬松,也都发现了 β -Araf 的存在。YongGang Xia 等人^[18]以草麻黄的茎干为研究对象,提取的一种分子量是 6.15 ku 的阿拉伯聚糖,通过 1D 以及 2D 核磁共振(Nuclear magnetic resonance, NMR) 技术鉴定出之前未被发现报道过的侧链: α -Araf \rightarrow 3)- α -Araf-(1 \rightarrow 3)- α -Araf-(1 \rightarrow)。有研究人员发现从植物中提取的许多多糖的生物活性和它们的侧链有关。最近从草麻黄中提取的一种酸性多糖具有免疫活性^[19-20],同时也有报道验证了这种多糖具有阿拉伯聚糖侧链^[18],而这可能是该多糖具有免疫活性的原因之一,需要通过实验进一步验证。Louise Jones 等人^[21]通过研究发现两条含有阿魏酸的 RG-I 链可以通过阿魏酸的氧化耦合作用形成了结构上的连接,对维持细胞壁的灵活性具有重要作用。

2 阿拉伯聚糖的活性研究

2.1 益生元活性

随着经济的发展,越来越多的人开始关注健康,因此具有益生元效应的纤维素、功能性低聚糖、抗性淀粉等糖类越来越受到人们的青睐^[26]。益生菌利用不能被人体消化吸收的糖类进行发酵,释放出能量,产生短链脂肪酸等代谢产物。这些代谢产物能够促进正常细胞的生长,抑制肿瘤细胞生长、诱导细胞分化和促进细胞凋亡^[32]。阿拉伯聚糖因不能被人体肠道直接消化吸收,因此可作为低脂产品的添加成分。阿拉伯低聚糖以及富含阿拉伯聚糖的果胶多糖曾被报道具有增殖肠道有益菌群的功能^[27-29]。Karolina Sulek 等人^[30]以低聚果糖(Fructo-oligosaccharides, FOS)为参照物,探讨了商业阿拉伯低聚糖(Arabinooligosaccharides, AOS)对来自于 6 个健康人的粪便微

表1 常见阿拉伯聚糖
Table 1 Partial arabinans

来源	主链连接方式	分子量 (ku)	聚合度	非还原端 (α/β 型)	残基组成 (Araf/Arap)	其他成分
Apple pomace ^[10]	1→5	-	5	$\alpha \beta$	Araf, Arap	葡萄糖
<i>Prunus dulcis</i> ^[12]	1→5	762	-	α	Araf	-
<i>Prunus dulcis</i> ^[13]	1→5	-	-	α	Araf	-
Dhulled apeseed ^[14]	1→2	-	6	α	Araf	-
Sugar beet ^[15]	1→5	-	-	α	Araf	阿魏酸
Olive pomace ^[16]	1→5	8.4	-	β	Araf	己糖醛酸
<i>Abies</i> ^[17]	1→5	-	-	β	Araf	-
<i>Ephedra sinica</i> ^[18]	1→5	6.15	-	α	Araf	-
Olive Pulp ^[22]	1→5	-	-	α/β	Araf	-
<i>Caesalpinia bonduc</i> ^[23]	1→5	62	13	α	Araf	葡萄糖
<i>Caesalpinia bonduc</i> ^[24]	1→5	200	7	α	Araf	-
Duckweed ^[25]	1→5	40	-	α	Araf	半乳糖

生物菌群的益生元效应, 尽管高分子量的阿拉伯低聚糖 (High-mass LA, >1 ku)、低分子量阿拉伯低聚糖 (Low-mass LA, <1 ku) 以及混合的阿拉伯低聚糖都能有选择的促进益生菌类的生长, 但是 HA 益生元效应和 FOS 相当, 同时略微比 LA 显著, 这说明分子量对 AOS 的益生元效应有影响, 即低分子量的阿拉伯低聚糖相比, 高分子量的阿拉伯低聚糖的益生元效应更好。此外, Jin Seok Moona 等人^[31] 以线性阿拉伯聚糖 (Linear arabinan, LAR, Mw = 18 ku) 及酶解后产生的阿拉伯低聚糖 (Linear arabino-oligosaccharides, LAOS, DP = 2-5) 为研究对象, 通过模拟人体消化系统发现 LAO 和 LAOS 并不能被人体消化。对人体内常见的 24 种微生物 (16 种有益及共生微生物、8 种有害微生物) 进行单独培养时, 发现 LAR 和 LAOS 能促进有益菌 (短乳杆菌、双歧杆菌) 和共生菌 (脆弱拟杆菌) 的生长。同时以分别加入 LAR、LAOS、FOS 的健康人体粪便排泄物为基质进行实验, 与 LAR 相比, LAOS 能使双歧菌在 24 h 内数量扩增了 9.23%, 这与 FOS 效果相当。但是发酵 LAOS 产生短链脂肪酸 (Short-chain fatty acids, SCFAs) 的速率却比 FOS 慢, 这使得产生的 SCFAs 可以到达结肠的末端, 有助于预防结肠癌、炎症等结肠末端疾病的发生^[32]。由此可得相对于 LAR, 甚至 FOS 标准品, LAOS 更适合被开发为有益肠胃类产品。Louise Kristine Vignæs 等人^[33] 以溃疡性结肠炎患者的粪便排泄物为对象, 发现从甜菜中提取的阿拉伯低聚糖 (AOS, DP = 2-10) 能促进双歧杆菌及乳酸杆菌的生长, 同时伴随着醋酸产物的生成及 pH 的降低, 而这有助于改善溃疡性结肠炎患者的炎症。

2.2 抗胃溃疡活性

溃疡病是一种常见的消化道疾病, 常发生于食管、胃或十二指肠。而目前普遍认为胃溃疡是坏死因子对胃黏膜自身的损坏形成的。LMC Cordeiro 等人^[34] 首次从藜麦中发现阿拉伯聚糖及富含阿拉伯聚糖的多糖具有减轻小鼠胃溃疡的活性。40 mg/kg 剂量的奥美拉唑对照物, 100 mg/kg 剂量的藜麦多糖可

以分别使胃溃疡面积降低 84%、72%。阿拉伯聚糖及富含阿拉伯聚糖的多糖之所以具有抗胃溃疡的生物活性, 可能是因为多糖可以促进一种粘附在胃黏膜的粘液的生物合成, 这种粘液可以在胃粘膜处形成一层保护, 阻止坏死因子的侵入。

2.3 脂类代替物

由于过多的摄入脂肪会增加肥胖症、心血管疾病的发病率, 因而利用现代食品科学技术开发脂肪产品代替物, 在维持食品原有口感、风味、品质的基础上, 降低食品中脂肪的含量, 从而达到与脂肪相同的效果。常见的脂类代替物通常分为四类: 碳水化合物基质、蛋白质基质、脂肪基质、复合型基质。其中基于碳水化合物的脂类代替物应用较为广泛, 几乎有 100 多年的历史。Srinivas Janaswamy 等人^[23] 酶解去除天然阿拉伯聚糖的所有侧链, 得到的产物具有与高脂产品相似的流变特性, 因而可以作为脂肪产品的替代物。

2.4 免疫刺激活性

植物多糖除了提供能量、构成细胞骨架等功能外, 最近几年被发现具有抗肿瘤、抗炎症、抗补体等生物免疫活性, 因而逐渐成为科学家的热点研究对象。Fernando Dourado 等人^[35] 从 *Prunus dulcis* 种子中分离纯化了一种富含阿拉伯聚糖的植物多糖 (70%~80% mol/mol), 该多糖可以活化淋巴细胞, 促进淋巴细胞和脾脏细胞的生长。Soumitra Manda 等人^[24, 36] 对提取的阿拉伯聚糖及葡聚阿拉伯聚糖进行结构鉴定及生物活性的分析, 发现这两种多糖除了可以刺激脾细胞和肝脏细胞生长的功能外, 与葡聚阿拉伯聚糖相比, 阿拉伯聚糖对巨噬细胞具有显著的活化效果, 增强了免疫细胞活力。其中葡聚阿拉伯聚糖的阿拉伯糖组分的结构与阿拉伯聚糖一致, 但是阿拉伯聚糖对巨噬细胞的活化效果更显著, 说明均一组分的阿拉伯聚糖的效果比含有葡萄糖的阿拉伯杂聚糖效果好。

3 目前研究问题与研究展望

目前关于阿拉伯聚糖的常见制备方法有化学及

酶法,其中以酶法为主。研究内容以结构为主,包括利用气相色谱-质谱联用(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、1D及2D-NMR技术对结构进行解析推测等,技术与方法已经相对成熟。由于阿拉伯糖可以与葡萄糖、甘露糖、蛋白质等组成杂聚糖、糖蛋白等,因此目前关于上述物质的生物活性研究相对较多,而关于均一组分的阿拉伯聚糖的生物活性研究相对较少,主要集中在益生元活性、免疫刺激活性、抗炎作用等方面^[37],关于其作用机理更是少之又少,这可能是与阿拉伯聚糖来源丰富,结构复杂有关。因此随着对阿拉伯聚糖深入的研究,除了发现新奇的结构及独特的生物活性之外,均一组分的阿拉伯聚糖的分离纯化、活性作用机理以及构效关系具有广泛的前景,如取代基团、分子量、聚合度等对功效的影响,这可以为定向开发利用新的功能性食品打下基础。

在果汁、罐头生产的工艺中会产生大量的废水废渣,其中含有较多的有机物,COD值较高,直接排放会污染环境^[38]。近年来,废弃物回收利用以增加产业价值的理念逐渐深入人心,因此除了上述来源之外,尝试从果渣、柑橘罐头类的废水废渣中提取回收阿拉伯聚糖有较大的前景,是一种重要“变废为宝”的途径和方法。除了上述提到的化学法及酶法之外,超声、辐射等新的技术可能也会成为生产阿拉伯聚糖的新方法。另外,微生物发酵法或者开发新的酶来制备阿拉伯聚糖,也可能成为新的热点。

参考文献

[1] Casci T, Rastall R A, Gibson G R. Human Gut microflora in health and disease: focus on prebiotics [J]. Food Biotechnology, 2006, 148: 1133.

[2] Kuang H, Xia Y, Yang B, et al. Screening and comparison of the immunosuppressive activities of polysaccharides from the stems of Ephedra sinica Stapf [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 787-795.

[3] Moore J P, Farrant J M, Driouich A. A role for pectin-associated arabinans in maintaining the flexibility of the plant cell wall during water deficit stress [J]. Plant Signaling & Behavior, 2008, 3(2): 102-104.

[4] Gullón P, González-Muñoz M J, Parajó J C. Manufacture and prebiotic potential of oligosaccharides derived from industrial solid wastes [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 6112-6119.

[5] Petkowicz C L O, Sierakowski M R, Ganter J L M S, et al. Galactomannans and arabinans from seeds of Caesalpiniaceae [J]. Phytochemistry, 1998, 49(3): 737-743.

[6] Ferreira J A, Mafra I, Soares M R, et al. Dimeric calcium complexes of arabinan-rich pectic polysaccharides from *Olea europaea* L. cell walls [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 65(4): 535-543.

[7] Swamy N R, Salimath P V. Arabinans from *Cajanus cajan* cotyledon [J]. Phytochemistry, 1991, 30(1): 263-265.

[8] Cardoso S M, Silva A M S, Coimbra M A. Structural characterisation of the olive pomace pectic polysaccharide arabinan side chains [J]. Carbohydrate Research, 2002, 337(10):

917-924.

[9] Coimbra M A, Delgado I, Waldron K W, et al. Isolation and analysis of cell wall polymers from olive pulp [M]. Plant cell wall analysis. Springer Berlin Heidelberg, 1996: 19-44.

[10] Walia M, Sharma U, Bhushan S, et al. Arabinan-type polysaccharides from industrial apple pomace waste [J]. Chemistry of Natural Compounds, 2013, 49(5): 794-798.

[11] Swamy N R, Salimath P V. Arabinans from *Cajanus cajan* cotyledon [J]. Phytochemistry, 1991, 30(1): 263-265.

[12] Dourado F, Madureira P, Carvalho V, et al. Purification, structure and immunobiological activity of an arabinan-rich pectic polysaccharide from the cell walls of *Prunus dulcis* seeds [J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(15): 2555-2566.

[13] Dourado F, Cardoso S M, Silva A M S, et al. NMR structural elucidation of the arabinan from *Prunus dulcis* immunobiological active pectic polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 66(1): 27-33.

[14] Eriksson I, Andersson R, Westerlund E, et al. Structural features of an arabinan fragment isolated from the water-soluble fraction of dehulled rapeseed [J]. Carbohydrate research, 1996, 281(1): 161-172.

[15] Levigne S V, Ralet M C J, Quémener B C, et al. Isolation from sugar beet cell walls of arabinan oligosaccharides esterified by two ferulic acid monomers [J]. Plant Physiology, 2004, 134(3): 1173-1180.

[16] Cardoso S M, Silva A M S, Coimbra M A. Structural characterisation of the olive pomace pectic polysaccharide arabinan side chains [J]. Carbohydrate Research, 2002, 337(10): 917-924.

[17] Shakhmatov E G, Toukach P V, Michailowa E A, et al. Structural studies of arabinan-rich pectic polysaccharides from *Abies sibirica* L. Biological activity of pectins of *A. sibirica* [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 515-524.

[18] Xia Y G, Liang J, Yang B Y, et al. Structural studies of an arabinan from the stems of *Ephedra sinica* by methylation analysis and 1D and 2D NMR spectroscopy [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121: 449-456.

[19] Kuang H, Xia Y, Yang B, et al. Screening and comparison of the immunosuppressive activities of polysaccharides from the stems of *Ephedra sinica* Stapf [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 787-795.

[20] Kuang H, Xia Y, Liang J, et al. Structural characteristics of a hyperbranched acidic polysaccharide from the stems of *Ephedra sinica* and its effect on T-cell subsets and their cytokines in DTH mice [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(4): 1705-1711.

[21] Jones L, Milne J L, Ashford D, et al. Cell wall arabinan is essential for guard cell function [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(20): 11783-11788.

[22] Cardoso S M, Ferreira J A, Mafra I, et al. Structural ripening-related changes of the arabinan-rich pectic polysaccharides from olive pulp cell walls [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(17): 7124-7130.

[23] Janaswamy S, Chandrasekaran R. Polysaccharide structures

from powder diffraction data: molecular models of arabinan [J]. Carbohydrate Research 2005 340(5): 835-839.

[24] Mandal E K, Mandal S, Maity S, et al. Structural studies of an immunostimulating gluco-arabinan from seeds of *Caesalpinia bonduc* [J]. Carbohydrate Polymers 2013 92(1): 704-711.

[25] Yu L, Yu C, Zhu M, et al. Structural analysis of galactoarabinan from duckweed [J]. Carbohydrate Polymers 2015, 117: 807-812.

[26] Yoo H D, Kim D J, Paek S H, et al. Plant cell wall polysaccharides as potential resources for the development of novel prebiotics [J]. Biomolecules and Therapeutics, 2012, 20(4): 371-379.

[27] Van Laere K M J, Hartemink R, Bosveld M, et al. Fermentation of plant cell wall derived polysaccharides and their corresponding oligosaccharides by intestinal bacteria [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2000 48(5): 1644-1652.

[28] Al-Tamimi M, Palframan R J, Cooper J M, et al. *In vitro* fermentation of sugar beet arabinan and arabino-oligosaccharides by the human gut microflora [J]. Journal of Applied Microbiology, 2006, 100(2): 407-414.

[29] Holck J, Lorentzen A, Vigsnaes L K, et al. Feruloylated and nonferuloylated arabino-oligosaccharides from sugar beet pectin selectively stimulate the growth of *Bifidobacterium* spp. in human fecal *in vitro* fermentations [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2011 59(12): 6511-6519.

[30] Sulek K, Vigsnaes L K, Schmidt L R, et al. A combined metabolomic and phylogenetic study reveals putatively prebiotic effects of high molecular weight arabino-oligosaccharides when assessed by *in vitro* fermentation in bacterial communities derived

from humans [J]. Anaerobe 2014 28: 68-77.

[31] Moon J S, Shin S Y, Choi H S, et al. *In vitro* digestion and fermentation properties of linear sugar-beet arabinan and its oligosaccharides [J]. Carbohydrate Polymers 2015 131: 50-56.

[32] 王晶. 短链脂肪酸对结肠肿瘤及其机制的影响 [J]. 饮食保健 2015(8): 217-218.

[33] Vigsnaes L K, Holck J, Meyer A S, et al. *In vitro* fermentation of sugar beet arabino-oligosaccharides by fecal microbiota obtained from patients with ulcerative colitis to selectively stimulate the growth of *Bifidobacterium* spp. and *Lactobacillus* spp [J]. Applied and environmental microbiology 2011 77(23): 8336-8344.

[34] Cordeiro L M C, de Fátima Reinhardt V, Baggio C H, et al. Arabinan and arabinan-rich pectic polysaccharides from quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds: Structure and gastroprotective activity [J]. Food Chemistry 2012 130(4): 937-944.

[35] Mandal S, Patra S, Dey B, et al. Structural analysis of an arabinan isolated from alkaline extract of the endosperm of seeds of *Caesalpinia bonduc* (Nata Karanja) [J]. Carbohydrate Polymers 2011 84(1): 471-476.

[36] Al-Tamimi M A, Mudalal S, Rastall R A. Production of Short Chain Arabino-oligosaccharides by Hydrolysis of Arabinan Using a Commercial Mixed Glycanase Preparations [J]. J Nutr Food Sci, doi: 10.4172/2155-9600.1000481.

[37] Lenoir-Wijnkoop I, Sanders M E, Cabana M D, et al. Probiotic and prebiotic influence beyond the intestinal tract [J]. Nutrition review 2007 65(11): 469-489.

[38] 吴丹. 柑橘罐头生产工艺排放水资源化利用研究 [D]. 杭州: 浙江大学 2014.

(上接第 390 页)

Communication 2015 6(6): 1190-1195.

[53] Zisman A, Peroni O, Abel E, 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.

[54] Hossain C M, Ghosh M K, Satapathy B S, et al. Apigenin causes biochemical modulation, GLUT4 and Cd38 alterations to improve diabetes and to protect damages of some vital organs in experimental diabetes [J]. Am J Pharmacol Toxicol 2014 9(1): 39-52.

[55] Xu M, Hu J, Zhao W, et al. Quercetin differently regulates insulin-mediated glucose transporter 4 translocation under basal and inflammatory conditions in adipocytes [J]. Molecular Nutrition & Food Research 2014 58(5): 931-941.

[56] Trajkovski M, Hausser J, Soutschek J, et al. MicroRNAs 103 and 107 regulate insulin sensitivity [J]. Nature 2011 474: 649-653.

[57] Ohno M, Shibata C, Kishikawa T, et al. The flavonoid apigenin improves glucose tolerance through inhibition of microRNA maturation in miRNA103 transgenic mice [J]. Scientific Reports 2013(3): 2553.

[58] Willeit P, Yin X, Kaudewitz D, et al. Circulating microRNA-122 is associated with incident metabolic syndrome and type-2

diabetes [J]. Circulation 2015 132(Suppl 3): A17961.

[59] Shibata C, Ohno M, Otsuka M, et al. The flavonoid apigenin inhibits hepatitis C virus replication by decreasing mature microRNA122 levels. [J]. Virology 2014 462-463: 42-48

[60] Kim M A, Kang K, Lee H J, et al. Apigenin isolated from *Daphne genkwa* Siebold et Zucc. inhibits 3T3-L1 preadipocyte differentiation through a modulation of mitotic clonal expansion [J]. Life Sciences 2014 101(2): 64-72.

[61] 刘春颖, 蒋淼, 屠洁, 等. 芹菜素对鼠肠 α -葡萄糖苷酶的抑制活性研究 [J]. 中国食品添加剂 2013(4): 90-95.

[62] Jagan K, Radika M K, Priyadarshini E, et al. A Study on the Inhibitory potential of DPP-IV Enzyme by apigenin through *in silico* and *in vivo* approaches [J]. Research Journal of Recent Sciences 2015(4): 22-29.

[63] Yamagata K, Miyashita A, Matsufuji H, et al. Dietary flavonoid apigenin inhibits high glucose and tumor necrosis factor α -induced adhesion molecule expression in human endothelial cells [J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2010, 21(2): 116-124.

[64] Bei R, Qin W, Wu F, et al. Apigenin and naringenin regulate glucose and lipid metabolism and ameliorate vascular dysfunction in type 2 diabetic rats [J]. European Journal of Pharmacology, 2016 773: 13-23.