

阿拉伯木聚糖对谷物食品的品质影响研究进展

王 立, 司晓静, 钱海峰, 李 言, 张 晖, 齐希光

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 阿拉伯木聚糖是谷物中广泛存在的一种非淀粉多糖, 具有独特的物理化学性质和营养价值, 对谷物产品的加工和最终产品的品质有较大的影响。作者综述了阿拉伯木聚糖对谷物产品加工性能的影响及其机制, 同时分析了其对最终产品品质的影响, 以为高品质谷物食品尤其是全谷物食品的开发提供依据。

关键词: 阿拉伯木聚糖; 谷物食品; 加工品质

中图分类号: TS 210.1 文章编号: 1673-1689(2020)07-0012-09 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.07.003

Research Progress of Effects of Arabinoxylan on the Quality of Cereals

WANG Li, SI Xiaojing, QIAN Haifeng, LI Yan, ZHANG Hui, QI Xiguang

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

Abstract: Arabinoxylan is one of non-starch polysaccharides, which is widely found in cereals. It is important for the quality of cereal products because of its special physical and chemical properties and nutritional value. This paper summarized the effects of arabinoxylan on the processing properties and final qualities of cereal products and the underlying mechanisms. The problems and future research fields were also discussed for its further development and utilization in better quality cereal products.

Keywords: arabinoxylan, cereal foods, processing quality

阿拉伯木聚糖(arabinoxylan, AX), 也称戊聚糖, 是一种存在于谷物中的非淀粉多糖, 其含量虽低却是细胞壁的重要功能组分^[1]。阿拉伯木聚糖主要分布在谷物胚乳及糊粉层细胞壁、麦麸组织和一些谷物的外壳中。由于谷物种属差异和种植条件的不同, 阿拉伯木聚糖的含量、分布甚至结构方面都具有差异性^[2-3]。

阿拉伯木聚糖, 是由 β -1,4糖苷键连接的线性木聚糖骨架组成的杂多糖, 其中 α -L阿拉伯呋喃糖单元通过 α -1,3和/或 α -1,2糖苷键连接到该骨架

上, 部分为C(O)-3位的单取代, 部分为C(O)-2位和C(O)-3位的双取代^[4]。阿拉伯糖侧链的数目和位置随谷物种类及品种而变化, 主链上的取代模式决定了AX的理化性质^[5]。部分AX链上还连接有少量其他侧链残基, 如六碳糖、葡萄糖醛酸、阿魏酸等。根据阿拉伯木聚糖在水中溶解度的不同, 一般将其分为水溶性阿拉伯木聚糖(water-extractable arabinoxylan, WEAX)和水不溶性阿拉伯木聚糖(water-unextractable arabinoxylan, WUAX), 两者取代基和相对分子质量不同, 通常后者的取代基数目

收稿日期: 2019-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471617, 31471679)。

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: wl0519@163.com

与相对分子质量大于前者^[6-7]。在谷物细胞壁中, WUAX 的质量分数通常高于 WEAX^[8]。

目前,常用的阿拉伯木聚糖来源有麸皮、啤酒糟、玉米芯和甘蔗渣等原料^[9-11],常用的提取分离方法有水提法^[12]、酸碱溶剂提取法^[13-14]、酶解提取法^[15]、机械辅助提取法^[16-17]等。由于原料中一般含有淀粉和蛋白质等组分,提取过程中需利用蛋白酶和淀粉酶进行除杂处理,也可采用静电分离等纯化方法得到纯度较高的 AX^[18-21]。不同的生产原料和提取方法对 AX 的溶解性、聚合度、相对分子质量、侧链取代模式以及纯度影响较大^[22-25]。

阿拉伯木聚糖是谷物中非淀粉多糖的主要成分,作为一种重要的膳食纤维,具有多种生理活性,包括调节肠道菌群^[26]、促进肠道健康^[27-28]、调节血糖和血脂水平^[29-30]、减少胆固醇吸收^[31]、调节代谢^[32-34]、抗氧化^[35-36]、抗炎^[37]、提高免疫^[38-39]等。同时,AX 特殊的物理化学性质,对谷物食品的加工(如面团的加工特性)也有较大的影响,对谷物食品的最终品质(如质构、感官、营养等)也有较大影响^[40-41]。

作者介绍了阿拉伯木聚糖在谷物食品加工中的应用,包括其在面团加工和后续产品加工过程中的作用,并对其作用机制进行了分析。最后,分析了阿拉伯木聚糖对谷物食品品质的影响,以期为高品质高营养价值的谷物食品提供依据。

1 阿拉伯木聚糖对谷物产品加工特性的影响

1.1 在面团加工中的作用及其机理

1.1.1 面团特性的变化 阿拉伯木聚糖具有较高的水分结合能力^[42]、黏度^[43]以及氧化胶凝的能力^[44-45],这些特性都会对面团的吸水、混合和流变性能有所改善。研究表明,在面团中添加 WEAX 可以改变面团的黏弹性并提高面团的持水力,且成正比关系^[46]。经木聚糖酶处理后,面团吸水率呈下降趋势,主要原因是木聚糖酶将 AX 水解成小分子的寡糖,这些寡糖结合水的能力弱于相对分子质量更大的 AX,从而导致持水性下降^[47]。Guo 等人^[48]研究发现,与高相对分子质量的 AX 相比,水解后低相对分子质量的 AX 可以通过降低与其他面团成分对水分的竞争,促进小麦面团形成更致密、更连续的面筋网络,表现出更好的面团加工特性。

在面团中添加阿拉伯木聚糖,可以改善面团的

拉伸强度和延展性^[49],也可以延长面团形成时间,增加面团稳定时间,提高面团的抗剪切性能^[50]。研究表明,添加小麦麸皮后,冷冻面团的拉伸性、延展性和黏弹性得到较好的改善,能有效防止冷冻贮藏中面团体积的变化,且面团中的自由水含量减少,流动性降低^[51],主要原因是小麦麸皮中所含的非淀粉多糖(主要是 AX)具有较强的持水能力,能有效结合水分子,减少冰晶的形成从而防止其对面筋蛋白网络的破坏^[52]。

阿拉伯木聚糖的添加还可增加发酵面团的持气性和稳定性,发酵面团可以看作是淀粉-面筋黏弹性基质、气室和在气泡之间形成液膜的液相共同组成的三相介质,液相含有多种化合物,例如蛋白质、脂质和多糖^[53]。面团中的 WEAX 可溶解在此液相中,增大此液相的黏度,从而稳定面团结构,增强生面团的稳定性和持气性。Wang 等人^[54]发现新鲜黑麦面团在添加质量分数 2% 的 WEAX 后具有更大的气室总体积、更高的气室密度和更低的平均气室体积。Döring 等人^[55]研究不同质量分数的碱提 AX 对小麦和黑麦面团蛋白质微观结构的影响时,发现质量分数 2.5% 的碱提 AX 可以帮助蛋白质形成更扩散和更广的分布结构,而质量分数高于 5.0% 则会产生负面影响。

关于阿拉伯木聚糖对于面团特性及其产品的影响仍存在不同观点,主要可能是由于实验所用面粉不同、所用 AX 结构不同以及实验方法不同。总之,已有的研究表明了 WEAX 对面团的加工特性具有正面改善作用,而 WUAX 对面团加工具有一定的负面作用,但若对 WUAX 进行化学改性或酶解,可改善其负面作用^[41,56-57]。

1.1.2 阿拉伯木聚糖对面团作用的机理 阿拉伯木聚糖对面团的作用一方面是基于其独特的氧化胶凝能力。AX 在面团中与其他成分竞争性吸收水分,使面团的持水性和面团形成时间增加^[46,58]。同时,在自由基存在时,AX 被氧化形成凝胶,大幅度提高其水合能力^[59],持水能力得到显著提升^[60]。可通过阿魏酸二聚反应形成氧化凝胶的 WEAX 可能是面团黏度变化的一个重要原因^[61]。氧化胶凝的能力取决于 AX、阿魏酸以及氧化剂的含量。但在较高的交联度下,分子溶胀受到阻碍,凝胶的持水性会下降^[62]。

另外,阿拉伯木聚糖凝胶在剪切力的作用下显

示出剪切变稀的性质^[23],这也是面团在过强的搅拌下吸水能力降低的原因之一。Bender 等人^[57]发现氢氧化钙提取的 AX 对无麸质面糊的流变性能的改善作用强于 WEAX,且在加入氧化剂后改善作用更加明显,可能是由于经氢氧化钙提取的 AX 的结构更复杂、吸水性更强,在氧化剂的作用下可以形成更紧密的交联网络,增大了面团的稠度。

阿拉伯木聚糖对面团的影响也来源于 AX 与面团基质(主要是面筋蛋白)的相互作用。谷物面团的黏性、弹性等流变学行为通常取决于搅拌过程中形成的连续面筋网络^[63-64]。大量研究表明:AX 不仅显著影响面筋的性质,而且对谷蛋白和谷蛋白聚合物的组成和流变特性也有影响^[65],但对其作用机制的理解还没有形成统一的认识。高质量分数的 AX 会干扰面团形成过程中蛋白质网络的形成,主要体现在面筋膨胀性和面筋生成量的下降。Döring 等人^[66]发现黑麦 WUAX 会包围蛋白质,阻碍黑麦蛋白之间的交联,对蛋白质网络形成负面影响。Michniewics 等人^[67]认为,WEAX 会积极参与面团形成过程中,并与面筋相互作用,从而改善面包加工特性。

Wang 等人^[68]的研究结果显示,WUAX 的颗粒特性可直接影响蛋白质间的相互作用,且通过与面团基质争夺水分间接影响面筋的生成,进而影响小麦面筋蛋白网络的形成,这种负面作用可以通过在面团搅拌过程中加入更多质量分数 2% 的 NaCl 溶液和延长搅拌时间来改善,但不能完全抵消。添加木聚糖酶也可以有效地抵消以上负面影响。Wang 等人^[68]推测,WUAX 一方面可以形成物理屏障,其高黏度抵消了蛋白质颗粒之间的吸引力从而直接干扰面筋蛋白质网络的形成过程,另一方面阿魏酸氧化胶凝形成凝胶网络,控制蛋白质颗粒间的聚集从而影响面筋产量,对蛋白质网络的形成产生负面影响。

Wang^[69]认为阿拉伯木聚糖通过与蛋白共价交联,影响面筋网络的流变特性。Bukša 等人^[70]发现在面团搅拌时形成了 AX 共聚物和 AX-蛋白复合物,并在发酵过程中继续形成。与此相反,Hilhorst 等人^[71]在小麦面团中没有发现 AX 与蛋白质交联,Labat 等人^[72]通过 SDS-PAGE 方法也没有检测到共价 AX 蛋白质复合物的出现。因此,在 AX 上的阿魏酸残基是否与蛋白质之间发生共价相互作用的问题,目前仍存在争议。

1.2 在面制品后续加工中的作用及其机制

1.2.1 阿拉伯木聚糖对面制品后续加工的影响

在面团形成后加工的过程中,各种工序都会对其中阿拉伯木聚糖的功能性质造成影响,进而改变其加工特性。如混合搅拌过程中 AX 的氧化交联,发酵过程中 AX 的酶解及酸解,焙烤过程中 AX 的热分解等反应导致 AX 溶解度、交联度的变化,都会对最终产品质量及营养价值造成影响^[73-76]。AX 的高持水性、高黏度以及氧化胶凝能力,对以软质小麦粉为原料的面制品(饼干、蛋糕)的后续加工有较大的影响^[77]。AX 增加了面糊的持气性,增大了最终产品的体积,但同时使面糊的黏附性增加,不利于面糊的扩散,影响饼干等产品的直径。面糊的可塑性降低,也可能导致表面裂纹的产生^[61]。Boskov Hansen 等人^[78]发现面团混合后,总 AX 的质量分数下降了 21%,主要是 WEAX 质量分数的下降。

阿拉伯木聚糖的添加可以影响面团的糊化特性。Saeed 等人^[50]发现 AX 添加到各个品种的小麦面团中均可提高其成糊温度和峰值温度,其影响程度随 AX 添加量的增加而增大,且对峰值温度的影响大于对成糊温度的影响。Ahmad^[47]发现将木聚糖酶加入小麦面团中后提高了其成糊温度,推测木聚糖酶的加入将大分子的 AX 分解成低聚糖和单糖,阻碍淀粉颗粒的膨胀,影响淀粉的糊化,从而提高了面团成糊温度。

Kiszonas 等人^[79]分析了全麦面粉和精制面粉所制作的面包在焙烤前后总阿拉伯木聚糖和水溶性阿拉伯木聚糖的质量分数变化,发现焙烤后总 AX 质量分数呈上升趋势,可能是由于热处理使 AX 与面粉中其他组分间的共价键水解,导致可被检测的总 AX 质量分数的增加。同时,焙烤后 WEAX 的质量分数呈下降趋势,推测可能是氧化交联导致其质量分数下降。

Knez 等人^[80]研究发现未添加酵母的面包中总阿拉伯木聚糖质量分数在焙烤前后没有显著差异,且 AX 质量分数高于添加酵母制作的发酵面包;同时,他们发现黑麦面包不同部位的总 AX 质量分数也没有显著差异,而发酵面包的面包顶部的 AX 质量分数略低于面包中心和面包侧面 AX 的质量分数,这可能是由于顶部接受更多热量,AX 发生了热分解。

Wang 等人^[54]发现在面团中添加水溶性阿拉伯

木聚糖能抑制冷冻贮藏过程中冰晶的形成,且随着WEAX添加量的提高,形成的冰晶逐渐减少且酵母的活力得到了更好地保存。添加质量分数2%的WEAX后,新鲜面团的产气能力提高,这可能与酵母对WEAX的代谢有关。

1.2.2 阿拉伯木聚糖在后续加工中的作用机制
添加水溶性阿拉伯木聚糖会增加面筋和气室之间的液相黏度,对面团结构及其稳定性产生积极影响。AX保护面团中蛋白质泡沫免受热破坏的能力和持气性,与AX黏度以及成膜性有关。AX的高黏度会增加气室周围面筋-淀粉膜的强度和弹性,从而减缓烘烤过程中面团内二氧化碳的扩散速度,形成较大的面包体积和较好的气孔结构^[40]。AX对面团体积的影响可以通过面团中AX的质量分数来控制,高于AX的最佳使用质量分数将导致面团黏度的增加,减小最终产品的体积。能够最大限度提高面包体积的AX的质量分数,取决于面粉的性质和AX本身的相对分子质量。

发酵过程中的酸解和酶解会导致水溶性阿拉伯木聚糖平均相对分子质量的降低甚至脱支化。WEAX的脱聚合与面团水化能力和水相黏度的降低有关。适度的AX脱聚合可能有利于面包的质量,因为它增强了面团的弹性,在最佳持气性下可以增加面包的体积。但是,AX的高强度脱聚合使水相黏度降低,会显著降低面团的气体保持能力,从而导致面包体积的减小。从面包的营养价值来看,WEAX的解聚可以提高面包的益生元潜力。然而,WEAX水解后,相对分子质量降低,会导致面包提取物黏度降低^[74],会减弱黑麦面包在降低人体血糖和血浆胆固醇方面的有效性,这可能与黑麦面包食用后消化道上部食糜黏度降低有关。

Buksa等人^[70]对含有2种或3种成分(阿拉伯木聚糖、淀粉和蛋白质)的特殊改性面团进行发酵,发现其发酵过程中AX发生水解;同时,这些短链发生了聚合和交联反应,这可能导致更长的AX链和更高相对分子质量的AX配合物的出现。在发酵过程中,如果面团中有两种成分组成,即不含蛋白质,则AX会发生交联和聚集,主要体现在未改性AX中。另一方面,对于三组分面团,AX的交联聚集主要体现在未改性AX中。同时,大量的水解AX分子与蛋白质产生较强的相互作用,阻碍了蛋白质在发酵过程中的解聚。

2 阿拉伯木聚糖对谷物产品品质的影响

2.1 产品质构

阿拉伯木聚糖对产品质构的影响,已有较多报道,结果也呈现多样化,综合分析可归因于以下几个方面的差异:AX的分离方法、纯度、添加量、以及谷物品种和加工方式^[56]。AX对烘焙发酵食品的积极影响包括黏度的增加、面团持气性的增强、保水能力的增强以及纹理的改善等。这些影响通常与AX的相对分子质量、半柔性线性构型、阿魏酸含量有关。在小麦面团中,麦胶蛋白和麦谷蛋白是已知的蛋白质组分,它们可以通过二硫键和分子间非共价相互作用形成连续的蛋白质基网络。黑麦面团中所含蛋白质的结构与性质不同于小麦面粉,只能形成有限的蛋白质交联网络^[55],所以AX对小麦面包和黑麦面包品质的影响不同^[60]。

面团的持水性对烘焙产品的品质影响较大,阿拉伯木聚糖的高吸水性使面包的含水率提高,水在面筋-淀粉复合基质中起增塑剂的作用,能够降低最终产品的刚性。同时,在面团中添加AX可以提高支链淀粉的凝胶紧实率和链有序度,增加面包体积,改善面包芯的质地。AX的相对分子质量显著影响面包芯的含水率,高相对分子质量的AX更利于保留面包中的水分。

也有报道显示,阿拉伯木聚糖的高持水特性会影响面团中的其他成分(淀粉及蛋白质)的水分利用率,面团的高含水量还会稀释面筋,可能会影响面包的最终物理特性(如体积)。Ahmad^[47]发现将AX酶解可以显著提升面包的品质。木聚糖酶以内、外方式破坏AX主链上的糖苷键,减少了干扰面筋网络形成的WUAX的含量,面筋生成量增加,制作的面包体积更大、面包芯结构更好。木聚糖酶能促进面筋网络的形成,但是过量的木聚糖酶会使聚合物过度水解,分子聚合度显著减小,造成面包品质的下降。

Buksa等人^[46]发现在两种黑麦粉制作的黑麦面团中加入未改性的、交联的或水解的阿拉伯木聚糖均能增加面团的含水量,水解AX对于面团的改善作用大于未改性AX,而交联AX增加面团的硬度和黏附性的程度大于未改性AX,不利于面包的制作,添加水解AX制作的面包具有更大的体积和含水量,面包芯的质地也更软。

采用选择性强的枯草芽孢杆菌内木聚糖酶(*Bacillus subtilis* endoxylanase, XBS)和曲霉内木聚糖酶(*Aspergillus aculeatus* endoxylanase, XAA)对阿拉伯木聚糖进行酶解研究,发现两者均会使WUAX溶解度增加,但不同的是,XBS增溶的WUAX主要在混合过程中释放,相对分子质量较高,使面包体积增加;而XAA增溶的WUAX主要在发酵过程中释放,相对分子质量较低,导致面包体积下降。

阿拉伯木聚糖的氧化胶凝特性使其可以作为无麸质面包的天然结构形成剂以改善其结构,改善程度与其结构特性相关。将玉米纤维中提取的阿拉伯木聚糖添加到无麸质面粉中制作面包,可以增大面包的比体积和吸水率,能够减少烘焙过程中的失水率,改善面包的硬度和纹理。

所有质量分数水平WEAX的添加,均可降低意大利面的黏稠度,增大其回弹性。具有较低水平的阿拉伯糖取代度的WEAX质量分数与煎饼整体体积的增加有关。AX的氧化胶凝化增加了面糊的黏性,使煎饼面糊有更好的持气性,制作的煎饼具有更大的体积。

2.2 产品感官品质

精制面粉制成的面制品通常为白色,当富含阿拉伯木聚糖的麦麸、纯化或改性的阿拉伯木聚糖等组分加入后,通常会使得最终产品的颜色变深。考虑到越来越多的消费者意识到由精制面粉制作的面制品营养性要低于全麦谷物食品,深色的全麦产品可能会受到消费者的青睐。对面筋含量高的面包制作而言,添加了WEAX的面包含水量更高,可以为其带来更绵软的口感。但AX的高黏度和氧化交联特性可能使面包的面筋网络形成受阻,面包的膨胀自由度减小,导致面包体积减小,口感变硬。但对于面筋含量低的无麸质面包,AX的高黏度和氧化交联特性使其可以作为天然的胶黏剂和结构形成剂,使无麸质面包具有更好的质地、更柔软的纹理以及更大的比体积。

低添加量的阿拉伯木聚糖能提高面条的蒸煮特性和蒸煮质感,使面条更耐煮,显著促进二硫键的形成、吸水率的增加以及蒸煮损失率的降低。同时也发现,高相对分子质量的AX对面条的影响优于低相对分子质量的AX,主要原因是高相对分子质量的AX对面条保水能力以及二硫键形成影响较大。

阿拉伯木聚糖具有减缓面包老化的作用,可以延长食品保质期。Biliaderis等人^[89]通过测量面包芯硬度来跟踪面包老化现象,研究显示在7 d的储存期内,AX强化的面包芯硬度一直较低。AX对面包芯质地的积极影响可能与其提高样品的含水量有关,因为水作为面团增塑剂降低了产品的刚性。另外,阿拉伯木聚糖的抗回生作用取决于面包配方中的AX的添加量和相对分子质量的大小。

2.3 产品营养特性

阿拉伯木聚糖是一种具有多种生理作用的膳食纤维。阿拉伯木聚糖的添加可减少食品中淀粉的含量,增加食品中半纤维素的含量,降低了食品中可消化性多糖的含量,其抗消化性使产品具有较低的升糖指数。WEAX可以与蛋白质发生共价交联,降低蛋白质的消化性。同时,阿拉伯木聚糖具有抗氧化特性,在改善食品品质的同时增加了食品的健康功效。

水溶性阿拉伯木聚糖分子间交联成网状结构,使肠胃内容物的黏度大大增加,形成黏性食糜,阻碍肠道机械搅拌内容物的能力,减缓肠道消化酶的消化速度,减慢肠道的流动速度,降低人体对于葡萄糖和脂质的消化吸收。阿拉伯木聚糖不能被小肠中的消化酶水解,到达结肠处才可被肠道微生物群发酵,产生小分子的阿拉伯木寡糖和低聚木糖,能够促进肠道有益菌的增殖,有利于肠道健康。非交联阿拉伯木聚糖的肠道利用率小于交联阿拉伯木聚糖。阿拉伯木聚糖还可降低血清胆固醇及胰岛素水平,对人体有多种健康效应。

3 阿拉伯木聚糖在谷物食品中的应用及展望

阿拉伯木聚糖具有高持水性、高黏性以及氧化胶凝性好等功能特性,在改善谷物产品品质方面发挥着独特作用。关于阿拉伯木聚糖在改善谷物产品品质方面已开展了较多研究,并取得了一些有用的研究结果,但综合来看,仍存在以下几个方面的问题:1)阿拉伯木聚糖结构复杂,导致其作用与结构之间的关系难以确定;2)不同的制备方法会使阿拉伯木聚糖的聚合度及阿拉伯糖取代度出现差异,其中机理有待明确;3)阿拉伯木聚糖侧链残基如阿魏酸残基的存在及含量对AX功能特性的影响还需要

进一步研究;4)阿拉伯木聚糖在改善谷物产品品质的研究大多停留在表现现象,虽然对 AX 与面筋蛋白的作用机理有一些猜想,但并未完全阐明。因此,建议在今后的研究中可侧重以下几个方面:1)深入研究阿拉伯木聚糖的结构,尤其是侧链基团,明确

其有效部位;2)深入研究阿拉伯木聚糖改善谷物产品品质的机理,尤其是与面筋蛋白的相互作用;3)研究比较不同加工方式对阿拉伯木聚糖结构的影响,进而探究其变化机理并将其应用于最终谷物产品的质量改善。

参考文献:

- [1] MIKKELSEN D, FLANAGAN B M, WILSON S M, et al. Interactions of arabinoxylan and (1,3) (1,4)-beta-glucan with cellulose networks[J]. **Biomacromolecules**, 2015, 16(4): 1232-1239.
- [2] BUKSA K, NOWOTNA A, ZIOBRO R, et al. Molecular properties of arabinoxylan fractions isolated from rye grain of different quality[J]. **Journal of Cereal Science**, 2014, 60(2): 368-373.
- [3] FINNIE S M, BETTGE A D, MORRIS C F. Influence of cultivar and environment on water-soluble and water-insoluble arabinoxylans in soft wheat[J]. **Cereal Chemistry**, 2006, 83(6): 617-623.
- [4] IZYDORCZYK M S, BILIADERIS C G J C P. Influence of structure on the physicochemical properties of wheat arabinoxylan[J]. **Carbohydrate Polymers**, 1992, 17(3): 237-247.
- [5] CYRAN M R, SAULNIER L. Macromolecular structure of water-extractable arabinoxylans in endosperm and wholemeal rye breads as factor controlling their extract viscosities[J]. **Food Chemistry**, 2012, 131(2): 667-676.
- [6] SKENDI A, BILIADERIS C G, IZYDORCZYK M S, et al. Structural variation and rheological properties of water-extractable arabinoxylans from six Greek wheat cultivars[J]. **Food Chemistry**, 2011, 126(2): 526-536.
- [7] MAES C, DELCOUR J A. Structural characterisation of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans in wheat bran [J]. **Journal of Cereal Science**, 2002, 35(3): 315-326.
- [8] PRITCHARD J R, LAWRENCE G J, LARROQUE O, et al. A survey of beta-glucan and arabinoxylan content in wheat[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2011, 91(7): 1298-1303.
- [9] ROSE D J, INGLET G E. Production of feruloylated arabinoxyloligosaccharides from maize (*Zea mays*) bran by microwave-assisted autohydrolysis[J]. **Food Chemistry**, 2010, 119(4): 1613-1618.
- [10] JAYAPAL N, SAMANTA A K, KOLTE A P, et al. Value addition to sugarcane bagasse: Xylan extraction and its process optimization for xylooligosaccharides production[J]. **Industrial Crops and Products**, 2013, 42(1): 14-24.
- [11] PULS J, SCHRÖDER N, STEIN A, et al. Xylans from oat spelts and birch kraft pulp[J]. **Macromolecular Symposia**, 2010, 232(1): 85-92.
- [12] GANGULI N K, TURNER M A. A simplified method for extracting water soluble arabinoxylans from wheat flour[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2010, 88(11): 1905-1910.
- [13] MALGORZATA C, COURTIN C M, DELCOUR J A. Heterogeneity in the fine structure of alkali-extractable arabinoxylans isolated from two rye flours with high and low breadmaking quality and their coexistence with other cell wall components[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2004, 52(9): 2671-2680.
- [14] XU F, LIU C F, GENG Z C, et al. Characterisation of degraded organosolv hemicelluloses from wheat straw [J]. **Polymer Degradation and Stability**, 2006, 91(8): 1880-1886.
- [15] SENF D, RUPRECHT C, KISHANI S, et al. Tailormade polysaccharides with defined branching patterns: enzymatic polymerization of arabinoxylan oligosaccharides[J]. **Angewandte Chemie International Edition**, 2018, 57(37): 11987-11992.
- [16] COELHO E, ROCHA M A M, SARAIVA J A, et al. Microwave superheated water and dilute alkali extraction of brewers' spent grain arabinoxylans and arabinoxyloligosaccharides[J]. **Carbohydr Polymers**, 2014, 99: 415-422.
- [17] WANG J, SUN B, CAO Y, et al. Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran[J]. **Food Chemistry**, 2014, 150(2): 482-488.
- [18] AGUEDO M, FOUNGIES C, DERMIENCE M, et al. Extraction by three processes of arabinoxylans from wheat bran and characterization of the fractions obtained[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2014, 105(5): 317-324.
- [19] BUKSA K, NOWOTNA A, PRAZNIK W, et al. Isolation, modification and characterization of soluble arabinoxylan fractions

- from rye grain[J]. **European Food Research and Technology**, 2012, 235(3):385-395.
- [20] SUN X F, XU F, SUN R C, et al. Characteristics of degraded hemicellulosic polymers obtained from steam exploded wheat straw [J]. **Carbohydrate Polymers**, 2005, 340(1):97-106.
- [21] ZHAO Xiaoqing, PENG Zhen, LIU Bin, et al. Research on a method of xylan preparation from wheat bran [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2017, 36(10):1111-1115. (in Chinese)
- [22] ORDAZ-ORTIZ J J, SAULNIER L. Structural variability of arabinoxylans from wheat flour. Comparison of water-extractable and xylanase-extractable arabinoxylans[J]. **Journal of Cereal Science**, 2005, 42(1):119-125.
- [23] KALE M S, YADAV M P, HICKS K B, et al. Concentration and shear rate dependence of solution viscosity for arabinoxylans from different sources[J]. **Food Hydrocolloids**, 2015, 47:178-183.
- [24] MARTÍ NEZ-LÓPEZ A L, CARVAJAL-MILLAN E, RASCÓN-CHU A, et al. Gels of ferulated arabinoxylans extracted from nixtamalized and non-nixtamalized maize bran: rheological and structural characteristics[J]. **CyTA – Journal of Food**, 2013, 11(sup1):22-28.
- [25] REVANAPPA S B, NANDINI C D, SALIMATH P V. Structural variations of arabinoxylans extracted from different wheat (*Triticum aestivum*) cultivars in relation to chapati-quality[J]. **Food Hydrocolloids**, 2015, 43:736-742.
- [26] HOPKINS M J, ENGLYST H N, MACFARLANE S, et al. Degradation of cross-linked and non-cross-linked arabinoxylans by the intestinal microbiota in children[J]. **Applied and Environmental Microbiology**, 2003, 69(11):6354-6360.
- [27] FRANCOIS I, LESCROART O, S VERAVERBEKE W, et al. Effects of wheat bran extract containing arabinoxylan oligosaccharides on gastrointestinal parameters in healthy preadolescent children [J]. **Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition**, 2014, 58(5):647-653.
- [28] BRAM D, LIESELOTTE C, WILLEM F B, et al. Consumption of breads containing in situ-produced arabinoxylan oligosaccharides alters gastrointestinal effects in healthy volunteers[J]. **Journal of Nutrition**, 2012, 142(3):470-477.
- [29] ANNE KROG I, PETER KAPPEL T, METTE SKOU H, et al. Resistant starch and arabinoxylan augment SCFA absorption, but affect postprandial glucose and insulin responses differently corrigendum[J]. **British Journal of Nutrition**, 2014, 111(9):1564-1576.
- [30] GARCIA A L, STEINIGER J, REICH S C, et al. Arabinoxylan fibre consumption improved glucose metabolism, but did not affect serum adipokines in subjects with impaired glucose tolerance[J]. **Hormone and Metabolic Research**, 2006, 38(11):761-766.
- [31] SARMA S M, SINGH D P, SINGH P, et al. Finger millet arabinoxylan protects mice from high-fat diet induced lipid derangements, inflammation, endotoxemia and gut bacterial dysbiosis[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2018, 106:994-1003.
- [32] LU Z X, WALKER K Z, MUIR J G, et al. Arabinoxylan fibre improves metabolic control in people with type II diabetes[J]. **European Journal of Clinical Nutrition**, 2004, 58(4):621-628.
- [33] HARTVIGSEN M L, LARKE H N, OVERGAARD A, et al. Postprandial effects of test meals including concentrated arabinoxylan and whole grain rye in subjects with the metabolic syndrome: a randomised study[J]. **European Journal of Clinical Nutrition**, 2014, 68(5):567-574.
- [34] SCHIOLDAN A G, GREGERSEN S, HALD S, et al. Effects of a diet rich in arabinoxylan and resistant starch compared with a diet rich in refined carbohydrates on postprandial metabolism and features of the metabolic syndrome [J]. **European Journal of Nutrition**, 2017, 57(2):1-13.
- [35] BAGDI A, TÖM ÖSK ÖZI S, NYSTR ÖM L. Hydroxyl radical oxidation of feruloylated arabinoxylan [J]. **Carbohydrate Polymers**, 2016, 152:263-270.
- [36] MALUNGA L N, BETA T. Antioxidant capacity of arabinoxylan oligosaccharide fractions prepared from wheat aleurone using *Trichoderma viride* or *Neocallimastix patriciarum* xylanase[J]. **Food Chemistry**, 2015, 167:311-319.
- [37] WU S, HU J, WEI L, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of Maillard reaction products from xylan with chitosan/chitoooligomer/glucosamine hydrochloride/taurine model systems[J]. **Food Chem**, 2014, 148:196-203.
- [38] SHUANGYUE Z, LI W, SMITH C J, et al. Cereal-derived arabinoxylans as biological response modifiers: extraction, molecular features, and immune-stimulating properties[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2015, 55(8):1035-1052.

- [39] 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]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2011, 51(2):178-194.
- [40] IZYDORCZYK M S, BILIADERIS C G. Cereal arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties [J]. **Carbohydrate Polymers**, 1995, 28(1):33-48.
- [41] SAEED F, PASHA I, ANJUM F M, et al. Arabinoxylans and arabinogalactans: a comprehensive treatise [J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2011, 51(5):467-476.
- [42] YADAV M P, KALE M S, HICKS K B, et al. Isolation, characterization and the functional properties of cellulosic arabinoxylan fiber isolated from agricultural processing by-products, agricultural residues and energy crops [J]. **Food Hydrocolloids**, 2017, 63:545-551.
- [43] CYRAN M R, CEGLIŃSKA A. Genetic variation in the extract viscosity of rye (*Secale cereale* L.) bread made from endosperm and wholemeal flour: impact of high-molecular-weight arabinoxylan, starch and protein [J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2011, 91(3):469-479.
- [44] ADRIANA M O, ELIZABETH C M, YOLANDA L F, et al. Characterization of water extractable arabinoxylans from a spring wheat flour: rheological properties and microstructure [J]. **Molecules**, 2013, 18(7):8417-8428.
- [45] ANA M, ELIZABETH CARVAJAL-MILLAN, YOLANDA L, et al. Syneresis in gels of highly ferulated arabinoxylans: characterization of covalent cross-linking, rheology, and microstructure [J]. **Polymers**, 2017, 9(5):1-11.
- [46] BUKSA K, ZIOBRO R, NOWOTNA A, et al. The influence of native and modified arabinoxylan preparations on baking properties of rye flour [J]. **Journal of Cereal Science**, 2013, 58(1):23-30.
- [47] AHMAD Z, BUTT M S, AHMED A, et al. Xylanolytic modification in wheat flour and its effect on dough rheological characteristics and bread quality attributes [J]. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, 2013, 56(6):723-729.
- [48] XIAO G, YANG S, ZHU K X. Impact of arabinoxylan with different molecular weight on the thermo-mechanical, rheological, water mobility and microstructural characteristics of wheat dough [J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2018, 53:2150-2158.
- [49] DENLI E, ERCAN R. Effect of added pentosans isolated from wheat and rye grain on some properties of bread [J]. **European Food Research and Technology**, 2001, 212(3):374-376.
- [50] SAEED F, AHMAD N, NADEEM M T, et al. Effect of arabinoxylan on rheological attributes and bread quality of spring wheats [J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2016, 40(6):1164-1170.
- [51] ADAMS V, RAGAEI S, ABDEL-AAL E M. Rheological properties and bread quality of frozen yeast-dough with added wheat fiber [J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2016, 97(1):191-198.
- [52] SHARADANANT R, KHAN K. Effect of hydrophilic gums on the quality of frozen dough: II. bread characteristics [J]. **Cereal Chemistry**, 2003, 80(6):773-780.
- [53] TURBIN-ORGER A, VALLE G D, DOUBLIER J L, et al. Foaming and rheological properties of the liquid phase extracted from wheat flour dough [J]. **Food Hydrocolloids**, 2015, 43:114-124.
- [54] WANG P, HAN T, JIN Z, et al. Impact of water extractable arabinoxylan from rye bran on the frozen steamed bread dough quality [J]. **Food Chemistry**, 2016, 200:117-124.
- [55] DÖRING C, NUBER C, STUKENBORG F, et al. Impact of arabinoxylan addition on protein microstructure formation in wheat and rye dough [J]. **Journal of Food Engineering**, 2015, 154:10-16.
- [56] IZYDORCZYK M S, DEXTER J E. Barley β -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products – a Review [J]. **Food Research International**, 2008, 41(9):850-868.
- [57] BENDER D, NEMETH R, CAVAZZI G, et al. Characterization of rheological properties of rye arabinoxylans in buckwheat model systems [J]. **Food Hydrocolloids**, 2018, 80:33-41.
- [58] SASAKI T, KOHYAMA K, YASUI T. Effect of water-soluble and insoluble non-starch polysaccharides isolated from wheat flour on the rheological properties of wheat starch gel [J]. **Carbohydrate Polymers**, 2004, 57(4):451-458.
- [59] PAVLOVICH-ABRIL A, ROUZAUD-SÁNCHEZ O, CARVAJAL-MILLÁN E, et al. Molecular characterization of water

- extractable arabinoxylans isolated from wheat fine bran and their effect on dough viscosity [J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2016, 74:484-492.
- [60] SCHOONEVELD-BERGMANS M E F, DIGNUM M J W, GRABBER J H, et al. Studies on the oxidative cross-linking of feruloylated arabinoxylans from wheat flour and wheat bran[J]. **Carbohydrate Polymers**, 1999, 38(4):309-317.
- [61] BETTGE A D, MORRIS C F. Oxidative gelation measurement and influence on soft wheat batter viscosity and end-use quality[J]. **Cereal Chemistry**, 2007, 84(3):237-242.
- [62] BAGDI A, TÖMÖSKÖZI S, NYSTRÖM L. Structural and functional characterization of oxidized feruloylated arabinoxylan from wheat[J]. **Food Hydrocolloids**, 2017, 63:219-225.
- [63] DOBRASZCZYK B J. The physics of baking: rheological and polymer molecular structure-function relationships in breadmaking [J]. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 2004, 124(1):61-69.
- [64] WIESER H. Chemistry of gluten proteins[J]. **Food Microbiology**, 2007, 24(2):115-119.
- [65] FREDERIX S A, VAN HOEYMISSEN K E, COURTIN C M, et al. Water-extractable and water-unextractable arabinoxylans affect gluten agglomeration behavior during wheat flour gluten-starch separation [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2004, 52(26):7950-7956.
- [66] DÖRING C, HUSSEIN M A, JEKLE M, et al. On the assessments of arabinoxylan localization and enzymatic modifications for enhanced protein networking and its structural impact on rye dough and bread[J]. **Food Chemistry**, 2017, 229(2):178-187.
- [67] MICHNIEWICZ J, BILIADERIS G G, BUSHUK W. Effect of added pentosans on some properties of wheat bread [J]. **Food Chemistry**, 1992, 43(4):251-257.
- [68] WANG M, HAMER R J, VLIET T V, et al. Effect of water unextractable solids on gluten formation and properties; mechanistic considerations[J]. **Journal of Cereal Science**, 2003, 37(1):55-64.
- [69] WANG M, VAN VLIET T, HAMER R J. How gluten properties are affected by pentosans [J]. **Journal of Cereal Science**, 2004, 39(3):395-402.
- [70] BUKSA K, LAKOMY A, NOWOTNA A, et al. Arabinoxylan-starch-protein interactions in specially modified rye dough during a simulated fermentation process[J]. **Food Chemistry**, 2018, 253.
- [71] HILHORST R, GRUPPEN H, ORSEL R, et al. Effects of xylanase and peroxidase on soluble and insoluble arabinoxylans in wheat bread dough[J]. **Journal of Food Science**, 2002, 67(2):497-506.
- [72] LABAT E, ROUAU X, MOREL M. Effect of flour water-extractable pentosans on molecular associations in gluten during mixing [J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2002, 35(2):185-189.
- [73] CLEEMPUT G, BOOIJ C, HESSING M, et al. Solubilisation and changes in molecular weight distribution of arabinoxylans and protein in wheat flours during bread-making, and the effects of endogenous arabinoxylan hydrolysing enzymes [J]. **Journal of Cereal Science**, 1997, 19(1):26-35.
- [74] WOUTER G, COURTIN C M, DELCOUR J A. Refrigerated dough syrupe in relation to the arabinoxylan population [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2003, 51(14):4119.
- [75] COURTIN C M, WOUTER G, KURT G, et al. Evidence for the involvement of arabinoxylan and xylanases in refrigerated dough syrupe [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2005, 53(19):7623-7629.
- [76] SIMSEK S, OHM J B. Structural changes of arabinoxylans in refrigerated dough [J]. **Carbohydrate Polymers**, 2009, 77(1):87-94.
- [77] MOIRAGHI M, VANZETTI L, BAINOTTI C, et al. Relationship between soft wheat flour physicochemical composition and cookie-making performance[J]. **Cereal Chemistry**, 2011, 88:130-136.
- [78] BOSKOV H, ANDREASEN M, NIELSEN M, et al. Changes in dietary fibre, phenolic acids and activity of endogenous enzymes during rye bread-making[J]. **European Food Research and Technology**, 2002, 214(1):33-42.
- [79] KISZONAS A M, FUERST E P, LUTHRIA D, et al. Arabinoxylan content and characterisation throughout the bread-baking process[J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2015, 50(8):1911-1921.
- [80] KNEZ M, ABBOTT C, STANGOULIS J C R. Changes in the content of fructans and arabinoxylans during baking processes of leavened and unleavened breads[J]. **European Food Research and Technology**, 2014, 239(5):803-811.