

阿拉伯木聚糖提取方法研究进展

王伟旭^{1,2},汪丽萍¹,于雷²,谭斌¹

(1. 国家粮食局科学研究院,北京 100037;2. 吉林农业大学,吉林 长春 130000)

摘要:阿拉伯木聚糖(AX)是谷物外层和胚乳细胞壁中一种重要的功能性半纤维素,在食品加工中可作为增稠剂、乳化剂、稳定剂、黏合剂等,对人类健康具有积极的影响作用。近年来,许多学者对谷物中AX的提取方法进行了广泛研究,建立了溶剂提取、酶提取和机械辅助提取等多种提取方法。由于大多数AX与谷物细胞壁其他成分以共价或非共价键的形式紧密连接,不同的提取方法对AX的得率具有不同影响。综述了谷物中AX的不同提取、纯化方法以及各种方法的优缺点,旨在为谷物中AX的开发利用提供指导。

关键词:阿拉伯木聚糖;提取方法;纯化;研究进展

中图分类号:TS 210.1 文献标识码:A 文章编号:1007-7561(2016)05-0024-05

Research progress on extraction methods of arabinoxylans

WANG Wei-xu^{1,2}, WANG Li-ping¹, YU Lei², TAN Bin¹

(1. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037;

2. Jilin Agricultural University, Changchun Jilin 130000)

Abstract:Arabinoxylans(AX) are one of the most important groups of hemicelluloses in the endosperm and outer layers of cereal grains, which can be used as a thickening agent, emulsifying agent, stabilizer or adhesive, etc in food processing and has beneficial effects on human health. Extraction methods for AX in grains were extensively studied in the recent years, which were solvent extraction, enzyme extraction and mechanical assisted extraction and other extraction methods. Because most AX and other components of the cell wall are closely connected in the form of covalent or non covalent bonds, the different extraction methods had different effects on the yield of AX. The advantages and disadvantages of different methods of extraction and purification of AX in grain were summarized to provide guidance for the development and utilization of the AX.

Key words:arabinoxylan; extraction methods; purification; research progress

阿拉伯木聚糖(AX)是谷物外层和胚乳细胞壁中一种重要的功能性半纤维素,基本结构是以(1→4)-β-D-吡喃木糖残基为主链骨架,通过C(O)-2,C(O)-3或C(O)-2,3键连接α-L-呋喃阿拉伯糖基取代物,同时含有一定量的阿魏酸基团,以酯键的形式连接于阿拉伯糖基侧链的C(O)-5位上。AX主要分布于小麦、大麦、燕麦、稻米、高粱以及谷子等粮食作物,此外在亚麻籽和香蕉皮等作物中的含量也很丰富。粮食中AX主要分布于淀粉质胚乳的细胞壁、糊粉层(aleurone)、麸皮以及一些谷物(如玉米)的外壳中,因作物种类与品种的不同含量各异,通常在所有谷物中,黑麦中AX含量最

高,其次是小麦和大麦。小麦、高粱、大麦、燕麦与黑麦的糊粉层中的AX含量要高于淀粉质胚乳中的含量,通常占AX总量的60%~70%(稻米糊粉层中AX含量仅占40%),而淀粉质胚乳中通常含有AX总量的20%~40%。AX具有诸多功能特性和生物活性,在食品中可作为增稠剂、乳化剂、稳定剂、黏合剂等,并且具有降低血清胆固醇、维持血糖水平、抗氧化活性、降低餐后血糖反应、增强免疫力以及减少冠心病风险等功能,同时也是生产具有益生元活性低聚木糖的主要原料^[1]。因此引起谷物化学家和营养学家的广泛兴趣。

AX分为水溶性阿拉伯木聚糖(WEAX)和水不溶性阿拉伯木聚糖(WUAX),其中WUAX是主要成分,在细胞壁中与木质素、纤维素、蛋白质、β-葡聚糖等成分以共价或非共价键连接,约占AX含量的90%。目前,国内外学者在AX提取纯化方面已进

收稿日期:2016-04-27

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZX1506)

作者简介:王伟旭,1992年出生,女,硕士研究生。

通讯作者:谭斌,1972年出生,男,博士,研究员。

行大量的研究工作,包括水提取、化学溶剂提取、酶水解提取以及机械辅助提取等。本文综述了各种提取和纯化方法对 AX 提取得率的影响,并总结了各种方法的优缺点,旨在为谷物中 AX 的开发利用提供指导。

1 水提取法

水提取法是分离 AX 最普遍方法之一。宋晓庆^[1]等人通过正交试验对高温灭酶的黑麦进行水提,研究料液比、浸提温度、浸提时间对 AX 得率影响,结果表明:在浸提时间 2 h,温度 60 °C,料水比 1:5 条件下,AX 得率达到最佳为 1.78%,并指出浸提温度和时间对得率影响较大。Ganguli^[2]等人研究以小麦面粉为原料,在料水比 1:10,室温搅拌 90 min 条件下提取 AX,使用淀粉转葡聚糖酶除淀粉,65% 乙醇纯化、沉淀获得 AX,AX 得率为 0.43%。水作为提取剂具有无毒无害、价廉易得、不需要回收等优点^[3]。但一定条件下水溶剂不能打破 AX 与细胞壁中其他物质的交联作用^[4],AX 得率较低,因此目前研究者致力于将物理方法预处理与水提取相结合制备 AX。苏东民和刘林等人^[5]研究对麸皮粉碎过 40 目筛、粉碎后超微和粉碎后发酵等预处理后 AX 得率的变化,结果表明:不经过任何处理的麸皮 AX 得率为 1.59%,过 40 目筛后提高到 1.93%,超微粉碎使得率提高至 2.17%,发酵处理使得率提高到 2.11%,三种预处理方式得率具有显著性差异,且均高于原料未做任何处理的。

2 化学溶剂提取法

AX 通常以结合态与蛋白质、纤维素连接,一般不易提取,因此在 AX 的提取过程中,提取试剂不仅要求对 AX 具有良好的溶解性,而且须具有氢键断裂的作用,故经常选用碱性溶剂和酸性溶剂。

2.1 碱溶剂提取法

碱溶剂具有断裂 AX 与细胞壁其他成分间酯键和氢键,释放水相半纤维,除去糖醛酸和乙酰基的作用^[6-7]。有文献报道在碱性环境中 70% 的 AX 可被提取^[8]。常用的碱溶剂有饱和 Ba(OH)₂、NaOH、KOH、饱和 Ca(OH)₂ 和 NaOH(含 H₂O₂)。由于各种试剂作用于细胞壁程度不同,因此提取 AX 效果存在很大差异。饱和 Ca(OH)₂ 溶剂对细胞壁破坏程度较小,对 AX 提取不完全;KOH 溶剂提取会引入大量盐离子,需要经过严格的脱盐处理^[9];饱和 Ba(OH)₂ 溶剂具有非常好的选择性,由于 Ba²⁺ 能够与细胞壁中的 β-葡聚糖作用形成不溶于饱和溶液 Ba(OH)₂ 的物质,通过离心除去,可得到较纯净的 AX^[10]。但是 Ba(OH)₂ 成本高,后续处理繁琐,只适合实验室提取。NaOH 溶剂是工业生产常用试剂,

其价格低廉,提取时间短,后续纯化、浓缩的工作量较小,溶解性较好,可将谷物中大部分 AX 提取出来;含 H₂O₂ 的 NaOH 溶剂提取中,H₂O₂ 在碱性介质中,具有漂白、脱除木质素的作用,增加 NaOH 对 AX 提取效率,被视为提取谷物麸皮 AX 的高效方法,但添加 H₂O₂ 会大幅度延长提取时间^[11]。

郑学玲^[12]用 NaOH,饱和 Ca(OH)₂ 溶剂从小麦麸皮中提取 AX,经减压浓缩,4 倍乙醇沉淀,除蛋白、淀粉后得到精制产品。结果表明:NaOH 溶剂提取得率为 8.02%,饱和 Ca(OH)₂ 溶剂提取得率为 4.43%。李雪^[13]比较饱和 Ca(OH)₂、饱和 Ba(OH)₂、NaOH、NaOH(H₂O₂)、碱性电解水 5 种不同溶剂对除蛋白、淀粉的小麦麸皮中 AX 提取效果,结果表明:不同溶剂的 AX 产率不同,饱和 Ba(OH)₂ 提取得率最大,达到 14.3%,其次 NaOH(H₂O₂) 得率为 10.86%,NaOH 得率 10.22%。目前,碱提醇沉法仍需考虑以下问题:一是碱提 AX 通常颜色较深,不利于应用;二是醇沉过程中消耗大量有机溶剂,对环境的污染程度较大,限制了工业的应用;三是碱性环境下易破坏多糖中阿魏酸等有效成分。

2.2 酸溶剂提取法

酸提取是获得 AX 另一种化学溶剂提取法。Xu^[14]等人研究在提取温度 85 °C、提取时间 4 h 的条件下分别利用乙酸/水(65/35),乙酸/水(80/20),乙酸/水(90/10),甲酸/乙酸/水(20/60/20),甲酸/乙酸/水(30/60/10),甲醇/水(60/40),和甲醇/水(60/40,0.1% HCL)作为提取剂对麦秸 AX 得率的影响。结果表明:甲酸/乙酸/水(30/60/10)作为提取剂时,半纤维得率达到最高为 29.6%(占麦秸干基重),其中 AX 含量占 78.1%。两种有机试剂(不含酸溶剂)获得的 AX 得率较低,分别为 5.5% 和 8.6%,因此利用酸溶剂会获得高产率的 AX。然而如果使用大量的酸溶剂处理谷物,部分 AX 可能被降解成低分子量化合物并且溶解于有机试剂,降低 AX 得率。

3 酶提取法

目前,利用酶制剂降解谷物提取 AX 的方法已被大量研究。木聚糖酶是分离 AX 关键的酶类型,其中内切-β-(1,4)-木聚糖酶最为常用,它能够打破木聚糖主链,随机清除内部 β-(1,4)-连接键并且渗入细胞壁网状结构中,降解 WEAX 产生混合型取代或未取代低聚木糖和增加溶解度获取部分 WUAX。不同谷物原料利用不同酶制剂和工艺条件对 AX 得率会产生很大的影响。张晓娜^[15]等人在小麦麸皮 AX 酶解工艺单因素研究的基础上,采用二次回归正交旋转组合对酶解工艺进行优化。建立

酶解温度、时间、酶用量及 pH 与 AX 得率的正交回归模型,得出在温度 60 °C、时间 3 h、酶用量 0.75% (酶与底物质量比, g/g)、pH 值 5 时得率最大,达到 15.28%,验证实验结果与模型值相符。Aguedo^[16]等人以除淀粉麸皮为原料,比较枯草芽孢杆菌木聚糖酶酶解和 NaOH 溶剂处理对 AX 得率的影响。结果表明:温度 55 °C 酶解 24 h 后,AX 得率为 4.3% (占除淀粉干基麦麸重),含量占 68.9%;0.44 mol/L NaOH 提取 AX 得率为 20.8%,含量为 57.5%。Alonso^[17]指出酶提取 AX 得率低可能由于存在木质纤维素晶体结构和物质自身存在的酶抑制剂限制酶水解。另外,研究表明木聚糖酶结合其他酶(例如纤维素酶)能够提高 AX 得率。E. Escarnot^[18]等人研究不同商业木聚糖内切酶(分别来自里氏木霉、细毛嗜热霉、枯草芽孢杆菌、特异腐质酶、棘孢曲霉、棘孢曲霉加里氏木霉)与商业纤维素酶(来自里氏木霉)结合处理麦麸麸皮。结果表明:纤维素酶可提高 AX 得率,未添加纤维素酶 AX 得率为 38.9%~68.6%,添加纤维素酶得率为 62.6%~74.8%。可能由于纤维素酶能够消化细胞壁 β -葡聚糖并且打破 AX 与 β -葡聚糖之间非共价键,释放更多 AX。

4 机械辅助提取法

为了提高 AX 提取效率,各种机械技术已经作为一种前处理工艺被广泛应用,其中包括蒸汽爆破法、挤压法、微波辅助法、超声辅助法。

4.1 蒸汽爆破法

谷物原料通过高压蒸汽处理后,压力迅速释放,导致爆发性的解聚,细胞壁结构被裂解后,物料中的木质素会因为烯丙醚键的断裂而产生很多低分子物质,从而使半纤维素中的木聚糖充分暴露出来,提高分离性、可降解性^[19]。影响蒸汽爆破决定性的因素有时间,温度和底物颗粒大小。Sun^[20]等人比较麦秸在 200 °C 下分别蒸汽爆破 10 min 和 33 min,在 220 °C 下蒸汽爆破 3 min、5 min 和 8 min 后,再利用 2%、pH 11.5 的碱过氧化氢在 50 °C 下处理 5 h。结果表明:麦秸经蒸汽爆破预处理后获得了富含低聚糖和单糖的半纤维素,碱过氧化氢处理后降解了原料中总半纤维的 77.0%~87.6%,其中半纤维素平均含量为 38.7%,但在蒸汽爆破后物质颜色黑沉。有文章报道^[21],蒸汽爆破致使聚合物严重降解,AX 得率偏低,但是作为提取 AX 的一种前处理方法,仍具有环境友好型和有效降解木质纤维素等优点^[22]。

4.2 挤压法

挤压技术已经作为一种前处理方法与碱溶剂法结合提取小麦麸皮中 AX。Leslie^[23]等人研究了中试规模碱性条件下双螺杆挤压生产麦秸和麦麸

AX,并进行精炼(超滤和阴离子交换层析代替乙醇沉淀)。在挤压螺杆转速为 150 r/min,传送带温度为 50 °C,麦麸/NaOH 为 2 时获取的粗提物进行精炼后,AX 产率为 24.3%,含量为 13.9%,与乙醇沉淀相比 AX 得率低,纯度也低。可能由于挤压得到复杂溶液包含共萃取物质(蛋白质,木质素等)、生物聚合物,虽然通过超滤脱盐和离子层析脱色,但复杂溶液的分离是困难的,因此纯度低。张晓娜^[24]等人研究酸水洗的小麦麦麸在挤压处理后粉碎,在 NaOH 浓度为 0.16 mol/L,作用温度和时间分别为 88 °C、120 min, H₂O₂ 浓度为 1.5% 时,碱可溶性 AX 得率可达到 20.89%。同时比较了挤压设备,即单螺杆和双螺杆挤压机对 AX 得率的影响,结果表明经双螺杆挤压处理后 AX 得率是单螺杆挤压的 2.5 倍。另外,研究表明,碱性条件下,挤压处理可以缩短原料中 AX 的溶出时间,并在短时间内 AX 得率与未处理原料相比较^[25]。Zeitoun^[26]等人也指出双螺杆挤压辅助方法具有缩短保留时间和降低水分含量的优点,可发展成为一种环境友好型工艺。

4.3 微波辅助法

在提取实验中利用微波辐射可缩短提取时间,并且可减小提取溶剂的体积,与传统提取方法相比约缩小 10 倍^[27-28]。Rose^[29]以酶法除蛋白、淀粉后的玉米皮为原料,在不同时间、温度下微波处理,结果表明在 180 °C 微波 10 min 或 200 °C 微波 2 min 条件下 AX 含量达到最大值为 50%。Obermeier^[30]等人利用微波辅助碱提分别在不同 NaOH 浓度,不同时间,不同温度下处理麦秸,考察对 AX 得率影响,结果表明,在 NaOH 浓度为 5%,微波温度 140 °C 和微波时间 10 min 时,AX 得率达到最大值 15.8% (占麦秸干基质量),含量为 73%。与传统的碱溶剂法相比,利用微波辅助极大地缩短了提取时间,并且不会导致 AX 过多地分解,原因可能是微波辐射属于自动水解过程,不要求强烈的化学试剂和酶制剂,保留了物质本身的性质。但是有文献表明,在这种自动水解高温下会产生一些不良物质,因此需要精制、纯化等步骤^[31]。

4.4 超声波辅助法

超声波法是一种温和的物理方法,其最大的优点是温度较低、提取时间短、收率高。王静^[32]等人研究了超声辅助酶法提取麦麸中的 AX。结果表明,在原料浓度 50 g/L,酶剂量 4.5 g/L,提取温度 50 °C,酶解时间 70 min,超声功率 180 W 时为最佳条件,产量达 142.6 ± 0.17 mg/g 小麦麦麸。张梅红^[33]研究了超声波辅助碱法提取 AX,固定 NaOH 浓度 0.3 mol/L、H₂O₂ 0.5%,分别对超声时间、超声

功率、料液比进行单因素试验。结果表明,最适宜的工艺为提取时间 20 min,功率 500 W,料液比为 1:30 时,AX 得率为 13.58%。但需要注意的是超声时间不宜过长,可能由于超声波具有较强的剪切作用,长时间会导致大分子多糖化学键断裂,降低多糖的提取率^[34]。

5 纯化

通过化学溶剂提取,酶提取、机械辅助提取获得的 AX 均属于粗提物,产物中往往含有一定量的蛋白质、淀粉、木质素等,如何在提取过程中获得高纯度的 AX,许多学者已经进行了大量研究。主要包括酶法、硅藻土吸附法、等电点法、乙醇分级沉淀除蛋白,酶法、湿筛法除淀粉,化学溶剂法除木质素。

位于细胞壁的蛋白质约占 15%~22%,一部分与糖相结合形成糖蛋白,在 AX 中较难去除。张海波^[35]选用不同种类蛋白酶(包括中性水解蛋白酶、Alclase 水解蛋白酶和碱性蛋白酶)研究对小麦麸皮蛋白质去除效果。实验表明碱性蛋白酶的效果最佳,Alclase 水解蛋白酶次之。同时张海波利用超声波辅助法除蛋白,确定了在超声时间 80 min、超声功率 300W 及料液比 1:12 条件下,蛋白质残留量最少为 3.2%。陈凤莲^[36]比较碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶脱除蛋白效果影响,结果也证明碱性蛋白酶除蛋白效率高。邢丽艳^[37]等人研究比较硅藻土吸附和酶解两种方法对 AX 提取过程中蛋白质脱除效果的影响。结果表明:酶法与硅藻土吸附法相比蛋白质脱除效率较高,可达 76.20%,但若在大规模工业生产中,为了降低成本可考虑采用硅藻土吸附法。周素梅^[38]等人将其碱提滤液的 pH 调为 4.5 后等电点离心除蛋白。郑学玲^[39]分别利用体积分数为 20%、50%、80% 的乙醇对水提取的 AX 和碱提取的 AX 进行逐步沉淀纯化分级,结果表明:随着乙醇体积分数的增加,蛋白质含量减少,AX 含量增加,当体积分数为 80% 时,碱提 AX 和水提 AX 含量分别增至为 87.42% 和 89.37%,达到最大值。

淀粉占细胞壁成分的 10%~20%,经除去淀粉后,麦麸的半纤维素中 AX 约占干基的 40%^[40],因此,为了获得高纯度的木聚糖,除淀粉是必需阶段。目前,除淀粉的方法有酶法和湿筛法。酶法是指利用淀粉酶将淀粉酶解为水溶性小分子而过滤除去。陈凤莲^[38]通过酶法除淀粉,淀粉残留量为 0.5% 以下。周素梅^[40]等人报道由于淀粉颗粒小于麸皮,利用湿筛(200 目)和水洗可有效除淀粉,其实验结果表明从 25.9% 降到了 4.2%。Mario Aguedo^[41]等人通过水洗和过滤也可有效除淀粉。

木质素与 AX 以共价酯键的形式相连,有报道

认为木质素被确定为酶降解植物次胞壁的一个限制因素^[42]。M. Bataillon^[43]等人利用次酸钠和硫酸去除木质素,提高了 AX 纯度。Hu 和 Wen^[44]等人表明微波辐射处理能够打破木质素结构。张晓娜^[27]认为 H₂O₂ 可促进细胞壁溶解,有利于木质素的解离。也有报道称 H₂O₂ 和亚氯酸盐脱除木质素对木聚糖提取得率并没有很大程度提高,并且使用中需加消泡剂或用较大体积的容器,消耗时间。同时郑学玲^[14]也认为除木质素对 AX 提取并无影响。目前并没有证明除木质素是否会提高 AX 得率的理论依据。

6 展望

目前,开发 AX 等营养健康的功能性食品配料是麦麸等粮食加工副产物增值转化的一个重要研究方向。AX 提取方法的研究是其食品化利用的重要基础。水提取、化学提取、酶提取和机械辅助提取已经广泛的应用于 AX 生产中,依据 AX 提取得率而言,碱溶剂法和机械辅助法具有更高的提取效率,但由于成本、仪器安全和环境等问题很难应用于工业生产中;酶法得率较低,但是可与机械辅助法、化学溶剂法相结合提高 AX 得率;机械辅助法具有提高 AX 得率的作用,其中蒸汽爆破法和挤压法均具有环境友好型优点,适合工业生产。然而现有的提取工艺中主要局限于以 AX 得率、纯度为指标确定提取条件,而对于 AX 结构、功能特性随条件的变化研究还很薄弱。因此,在未来谷物 AX 的提取方法研究中,可以将新兴的生物技术、机械辅助技术与传统的化学提取方法相结合,一是在保证 AX 得率、纯度的前提下,结合 AX 结构、功能性质综合评价提取工艺,建立提取条件与 AX 功能、结构之间的关系,提高 AX 利用效率;二是制备具有特定分子结构的 AX 应用于食品、医药领域,提高健康营养价值;三是随着工业化的发展改善 AX 提取方法,使提取技术更多的趋向于环保、高效、低能的方向发展。

参考文献:

- [1] 宋晓庆,董海洲. 黑麦水溶性阿拉伯木聚糖提取工艺的研究[J]. 西部粮油科技,2003(5):22-23.
- [2] Ganguli, N K, Turner, M A. A simplified method for extracting water extractable arabinoxylans from wheat flour[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2008(88):1905-1910.
- [3] 秦菲,王龙. 原花青素提取方法的研究进展[J]. 北京联合大学学报(自然科学版),2012,11(4):36-39.
- [4] Izydorczyk, M. S., Biliaderis, C. G. Arabinoxylans: Technologically and nutritionally functional plant polysaccharides [J]. Functional Food Carbohydrates,2007:249-290.
- [5] 苏东民,刘林,李雪,等. 不同预处理方法对小麦麸皮阿拉伯木聚糖提取得率的影响[J]. 粮食加工,2011,36(4):37-39.
- [6] Leslie Jacquemin. Performance evaluation of a semi-industrial production process of arabinoxylans from wheat bran[J]. Process Bio-

- chemistry, 2015(50):605-610.
- [7] I. Janker - Obermeier, V. Sieber, M. Faulstich, et, al. Solubilization of hemicellulose and lignin from wheat straw through microwave - assisted alkali treatment[J]. *Industrial Crops and Products*, 2012(39): 198-203.
- [8] 过嫣丹. 麸质阿拉伯木聚糖的改性及应用[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [9] 吕姗姗. 小麦麸皮低聚木糖的提取精制及其功能性研究[D]. 东北林业大学, 2007.
- [10] Cyran M, Courtin C M, Delcour J A. Heterogeneity in the fine structure of alkali - extractable isolated from two rye flours with high and low breadmaking quality and coexistence with other cell wall components[J]. *Journal of Agriculture and food chemistry*, 2004, 52(9):2671-26.
- [11] Bazus A, Rigal L, Gaset A. Isolation and characterization of hemicelluloses from sunflower hulls[J]. 1993(243):323-332.
- [12] 郑学玲. 小麦麸皮戊聚糖的分离制备、理化性质及功能特性研究[D]. 无锡. 江南大学. 2002.
- [13] 李雪. 不同碱性提取剂对小麦麸皮水不溶性阿拉伯木聚糖提取效果的比较研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(21):272-276.
- [14] F Xu, C F Liu, Z C Geng, et al. Characterisation of degraded organosolv hemicelluloses from wheat straw[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91:1880-1886.
- [15] 张晓娜, 周素梅, 王世平. 二次回归正交旋转组合设计对麦麸中阿拉伯木聚糖酶解工艺的优化[J]. *食品科学*, 2008(11):141-145.
- [16] Mario Aguedo. Christian Fougnyes Michal Dermience, et al. Extraction by three processes of arabinoxylans from wheat bran and characterization of the fractions obtained [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 105:317-324.
- [17] Alonso J L, Domínguez H X, Garrote G, Parajó J C, et al. Xylooligosaccharides: Properties and production technologies. *Electronic Journal of Environmental [J]. Agricultural and Food Chemistry*, 2003(2):230-232.
- [18] E Escarnot, M Aguedo, M Paquot. Enzymatic hydrolysis of arabinoxylans from spelt bran and hull [J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 55:243-253.
- [19] 唐伟. 小麦麸皮中低聚木糖提取技术的研究[D]. 黑龙江八一农垦大学. 2010.
- [20] X F Sun, F Xu, R C Sun, et al. Characteristics of degraded hemicellulosic polymers obtained from steam exploded wheat straw [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 60:15-26.
- [21] Glasser W G, Kaar W E, Jain R K, Sealey J E. Isolation options for non cellulose heteropolysaccharides (HetPS) [J]. *Cellulose*, 2000, 7(3):299-317.
- [22] Avellar B K, Glasser W G. Steam - assisted biomass fractionation. I. Proces considerations and economic evaluation [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1998(14):205-218.
- [23] Leslie Jacquemin. Performance evaluation of a semi - industrial production process of arabinoxylans from wheat bran [J]. *Process Biochemistry*, 2015, 50:605-613.
- [24] 张晓娜, 王世平, 周素梅, 等. 小麦麸皮阿拉伯木聚糖碱提工艺条件优化研究 [J]. *核农学报*, 2008, 22(1):60-64.
- [25] 张晓娜. 小麦麦麸中阿拉伯木聚糖的提取及生理活性研究 [D]. 中国农业大学. 2007.
- [26] Rawan Zeitoun, Pierre Yves Pnotailier, Philippe Marechal, et al. Twin - screw extrusion for hemicellulose recovery: Influence on extract purity and purification performance [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:9348-9354.
- [27] 吕晓晶, 韩玉洁. 微波处理对小麦麸皮酶法制取低聚木糖的影响 [J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(4):50-52.
- [28] Elisabete Coelho M, Angélica M, Rocha Jorge A. Saraiva, et, al. Microwave superheated water and dilute alkali extraction of brewers spent grain arabinoxylans and arabinoxyl - oligosaccharides [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014:415-422.
- [29] Devin J. Rose, George E. Inglett. Production of feruloylated arabinoxyl - oligosaccharides from maize (Zea mays) bran by microwave - assisted autohydrolysis [J]. *Food Chemistry*, 2010, 119:1613-1618.
- [30] I Janker - Obermeier, V Sieber. Solubilization of hemicellulose and lignin from wheat straw through microwave - assisted alkali treatment [J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 39:198-203.
- [31] Vegas R, Alonso J L, Dominguez H, Parajo J C. Processing of rice husk autohydrolysis liquors for obtaining food ingredients [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(24):7311-7317.
- [32] Jing Wang, Baoguo Sun, Yingli Liu, Huijuan Zhang. Optimisation of ultrasound - assisted enzymatic extraction of arabinoxylan from wheat bran [J]. *Food Chemistry*, 2014, 150:482-488
- [33] 张梅红. 小麦麸皮阿拉伯木聚糖的制备及益生活性研究 [D]. 中国农业科学院. 2013.
- [34] 舒任庚, 蒋跃平, 蔡永红. 植物多糖的提取分离方法探讨 [J]. *中国药房*, 2011, 22(11):1053-1055.
- [35] 张海波. 小麦麸皮制备低聚木糖的研究 [D]. 江南大学, 2008.
- [36] 陈凤莲. 小麦麸皮中低聚木糖的生物制备技术研究 [D]. 东北林业大学. 2006.
- [37] 邢丽艳, 苏东民, 苏东海, 等. 小麦粉水溶性阿拉伯木聚糖提取过程中蛋白质脱除方法的研究. *河南工业大学学报(自然科学版)* [J]. 2012. 33(3):24-27.
- [38] Sumei Zhou, Xiuzhen Liu, Yan Guo, et al. Comparison of the immunological activities of arabinoxylans from wheat bran with alkali and xylanase - aided extraction. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 81:784-789.
- [41] 郑学玲, 姚惠源. 小麦麸皮中戊聚糖的纯化分级及组成分析 [J]. *无锡轻工大学学报*, 2002, 21(4):323-335.
- [40] Aguedo M, Vanderghem C, Goffin D, Richel A, Paquot M. Fast and high yield recovery of arabinose from destarched wheat bran. *Industrial Crops and Products* [J]. 2013. 43:318-325.
- [41] Mario Aguedo. Christian Fougnyes. Micha? l Dermience, et al. Extraction by three processes of arabinoxylans from wheat bran and characterization of the fractions obtained [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 2(105):317-324.
- [42] S Benamrouche, D Cromier, P Debeire, et al. A Chemical and Histological Study on the Effect of (1 \rightarrow 4) - β - endo - xylanase Treatment on Wheat Bran [J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36(2):253-260.
- [43] M. Bataillon. P. Mathaly. A. - P. Nunes Cardinali. Extraction and purification of arabinoxylan from destarched wheat bran in a pilot scale [J]. *Industrial Crops and Products*, 1998(8):37-43.
- [44] Hu Z, Wen Z. Enhancing enzymatic digestibility of switchgrass by microwave - assisted alkali pretreatment [J]. *Biochem. Eng. J.*, 2008, 38(3):369-378. ☞