

doi:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.05.007

文章编号:2095-6002(2021)05-0056-07

引用格式:孙元琳,田玉荣,刘瑞,等.加工工艺对黑小麦麸皮戊聚糖组成与理化性质的影响[J].食品科学技术学报,2021,39(5):56-62.



SUN Yuanlin, TIAN Yurong, LIU Rui, et al. Effect of processing technology on composition and physicochemical properties of pentosans from black-grained wheat bran[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(5):56-62.

## 加工工艺对黑小麦麸皮戊聚糖组成与理化性质的影响

孙元琳<sup>1</sup>, 田玉荣<sup>2</sup>, 刘瑞<sup>1</sup>, 王晨星<sup>1</sup>

(1. 运城学院 生命科学系/特色农产品加工山西省重点实验室, 山西 运城 044000;

2. 山西省食品研究所(有限公司), 山西 太原 030024)

**摘要:**以黑小麦麸皮为研究对象,采用挤压、微波-挤压加工工艺处理黑小麦麸皮,分别提取水溶性和水不溶性戊聚糖,并采用离子色谱、高效液相色谱和流变仪分析不同加工工艺条件下戊聚糖组成与理化性质的变化。结果表明:黑小麦麸皮经挤压、微波-挤压加工工艺处理后,水溶性戊聚糖得率增大,水不溶性戊聚糖得率减小,总戊聚糖得率由5.76%分别增加到6.43%和11.32%;不同戊聚糖组分的单糖组成主要由阿拉伯糖、木糖和葡萄糖以及微量半乳糖组成;挤压、微波-挤压处理后葡萄糖含量增加,水溶性戊聚糖的分支度逐步降低,水不溶性戊聚糖分支度逐步升高;各戊聚糖组分的相对分子质量和黏度随加工工艺处理均有所下降,结合态阿魏酸含量明显增加。研究表明,采用挤压、微波-挤压加工工艺处理黑小麦麸皮,有助于提高戊聚糖得率,增加水溶性戊聚糖的含量,可以进一步改善戊聚糖的理化性质。

**关键词:**黑小麦麸皮;戊聚糖;挤压;微波-挤压;理化性质

**中图分类号:**TS210.1;TS210.9

**文献标志码:**A

黑小麦是籽粒颜色呈紫色、蓝色、蓝紫色和紫黑色的特色麦类作物<sup>[1]</sup>。与普通小麦相比,黑小麦中膳食纤维、酚酸、花青素、B族维生素和微量元素等生物活性物质含量更高,并因其特殊的营养价值而备受关注。黑小麦麸皮是黑小麦加工的副产物,其膳食纤维含量丰富,其中,戊聚糖是黑小麦膳食纤维的主要组成部分<sup>[2]</sup>。研究表明,戊聚糖能够增殖有益菌、改善肠道菌群结构,对糖尿病、肥胖、心血管疾病和结肠癌等慢性疾病具有预防作用<sup>[3-4]</sup>。

戊聚糖是以 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-糖苷键连接的 $\beta$ -D-吡喃木糖为主链, $\alpha$ -L-呋喃阿拉伯糖为侧链,主链的C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>位被阿拉伯糖基单取代或双取代,某些阿拉伯糖

的C<sub>5</sub>位上还存在以酯键相连的阿魏酸<sup>[5]</sup>。戊聚糖根据溶解度可分为水溶性和水不溶性戊聚糖。水溶性戊聚糖在水中溶解度较高;水不溶性戊聚糖以共价键或非共价键形式与细胞壁中的蛋白质、纤维素及木质素等成分相互作用,形成致密的组织结构而难溶于水<sup>[6]</sup>。采用Ba(OH)<sub>2</sub>、NaOH等碱性化学试剂,通过挤压、微波等物理机械辅助预处理方式,能够打断戊聚糖与细胞壁组分之间的紧密结合,促进细胞壁溶胀,使水不溶性戊聚糖向水溶性戊聚糖转换溶出,从而提高戊聚糖得率。目前,国内对黑小麦戊聚糖的研究主要集中在单一体系戊聚糖的制备,并未综合考虑将加工技术手段与提取方法结合处理

收稿日期:2021-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32072222);山西省自然科学基金资助项目(201901D111296);山西省重点研发计划项目(201803D221008-7;201903D211006-3)。

第一作者:孙元琳,女,教授,博士,主要从事特色农产品加工与增值技术研究。

麦麸来提高戊聚糖得率。本研究拟采用挤压、微波-挤压两种加工工艺对黑小麦麸皮进行品质改良,促进不溶性戊聚糖向可溶性戊聚糖转化,分析不同加工工艺对戊聚糖组成和理化性质的影响,以期改善黑小麦膳食纤维的功能特性,推动黑小麦资源的开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

黑小麦:运黑 14207。黑小麦麸皮,采用石磨工艺磨粉制麸。

木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、三氟乙酸、反式-阿魏酸,美国 Sigma 公司;所用试剂均为分析纯。

### 1.2 主要仪器与设备

ICS1100 型离子色谱仪,美国 DIONEX 公司; TENSOR 27 型傅里叶红外光谱仪,德国布鲁克公司;LC-SPD-20A 型全自动高效液相色谱仪,日本岛津公司;MCR102 型流变仪,奥地利安东帕有限公司;DS32-II 型双螺杆挤压机,济南赛信机械有限公司;LW-20HVM-4X 型隧道式微波干燥杀菌设备,山东立威微波设备有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 原料加工工艺

1) 双螺杆挤压膨化工艺。取适量黑小麦麸皮备用,计算调节水分所需的用水量,并将黑小麦麸皮放入搅拌机中搅拌 2 min,同时加入蒸馏水调节水分。将调节水分后的黑小麦麸皮投入双螺杆挤压机中进行挤压膨化。设定挤压膨化的条件为:水分质量分数 20%,螺杆 I 区温度 25 °C, II 区温度 100 °C, III 区温度 110 °C,主机频率 26.4 Hz,喂料频率 10.80 Hz,旋切频率 60 Hz。

2) 微波-挤压工艺。将黑小麦麸皮放入搅拌机中搅拌 2 min,同时加入蒸馏水调节水分质量分数至 20%。按微波设定,以输出功率 40 kW,加热温度 85 °C,传送速度 2 m/min 对黑小麦麸皮进行微波热处理。微波处理结束后,继续加水使黑小麦麸皮中水分质量分数维持在 20%,之后投入双螺杆挤压机中处理。

#### 1.3.2 戊聚糖提取工艺

将未处理原料和经挤压、微波-挤压的黑小麦麸皮用体积分数为 70% 的乙醇于 70 °C 下高温热处理 2 次,抽滤并晾干,样品干燥完全后称重备用。

1) 水法提取戊聚糖。取原料、挤压和微波-挤压预处理后的黑小麦麸皮各 100 g,分别以 1:10 (g:mL) 料液比加水混匀,40 °C 搅拌 1 h,离心(3 000 r/min) 20 min,收集上清液(沉淀用于后续碱提)。将上清液 60 °C 旋转蒸发浓缩,加 4 倍 95% 乙醇沉淀,4 °C 过夜,抽滤,沉淀加水,复溶,透析 48 h,冷冻干燥即得未处理水溶性戊聚糖(WEAX)、挤压水溶性戊聚糖(E-WEAX)和微波-挤压水溶性戊聚糖(ME-WEAX)。

2) 碱法提取戊聚糖。取水提离心后沉淀,以 1:10 (g:mL) 料液比加入饱和 Ba(OH)<sub>2</sub> 溶液,常温搅拌 2 h,离心 15 min(3 000 r/min),取上清液。沉淀再次按上述方法处理,离心,合并两次上清液。将收集到的上清液用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 值至 5.5,静置 30 min,离心(3 000 r/min),收集上清液。将上清液 60 °C 旋转蒸发浓缩,加 4 倍 95% 乙醇沉淀,4 °C 过夜,抽滤,沉淀加水复溶,透析 48 h,冷冻干燥即得未处理水不溶性戊聚糖(WUAX)、挤压水不溶性戊聚糖(E-WUAX)和微波-挤压水不溶性戊聚糖(ME-WUAX)。

#### 1.3.3 戊聚糖得率的计算

戊聚糖得率计算方法见式(1)。

$$\text{戊聚糖得率} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $m_1$  为戊聚糖质量,g; $m_2$  为原料质量,g。

#### 1.3.4 多糖含量的测定

采用苯酚-硫酸法测定多糖含量<sup>[7]</sup>。以一定比例的葡萄糖、阿拉伯糖和木糖为标准制作标准曲线。

#### 1.3.5 戊聚糖含量的测定

参照 NY/T 2335—2013《谷物中戊聚糖含量的测定 分光光度法》<sup>[8]</sup>测定戊聚糖含量。

#### 1.3.6 单糖组成的测定

准确称取戊聚糖样品 3 mg 溶于 2 mol/L 三氟乙酸,121 °C 水解 1 h,去除过量的三氟乙酸,采用离子色谱分析单糖组成。将各戊聚糖样品的单糖组成图谱与标准单糖离子色谱图的出峰时间进行比较,确定单糖的种类,根据峰面积的比值确定各单糖间的比例关系。

检测条件:CarboPacPA20 型色谱柱,柱温 30 °C,检测器为电化学检测器,用 10 mmol/L KOH 进行等度洗脱,进样体积 25 μL,样品与标准品进样前用 0.45 μm 微孔滤膜过滤。

### 1.3.7 阿魏酸含量的测定

阿魏酸的提取<sup>[9]</sup>:精确称量 0.3 g 样品加入 24 mL 2 mol/L NaOH 溶液,密封,反应过夜。加 6 mol/L 盐酸溶液调节 pH 值至 2,利用等体积乙酸乙酯溶液萃取 4 次,合并上清液,并在 45 °C 下旋转蒸发至干,用甲醇定容至 10 mL,放冰箱保存。

液相检测条件:色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm),流动相为乙腈(溶剂 A)和 1% 冰乙酸(溶剂 B),流速为 0.8 mL/min,柱温为 40 °C,检测波长为 320 nm,进样量为 10 μL。所有样品进样前均用 0.45 μm 滤膜过滤。梯度洗脱程序:0~4 min 流动相 B 的体积分数由 79% 降至 77%;4~8 min 流动相 B 的体积分数由 77% 降至 60%;8~11 min 流动相 B 的体积分数由 60% 降至 0;11~21 min 流动相 B 的体积分数由 0 升至 79%。

### 1.3.8 戊聚糖相对分子质量分布

将戊聚糖样品加水溶解成均一溶液,采用高效液相色谱仪检测戊聚糖相对分子质量。

高效液相色谱条件<sup>[10]</sup>:检测器为示差折光检测器,色谱柱为 Ultrahydrogel TMLinear (7.8 mm × 300 mm, 5 μm),流动相为 0.1 mol/L NaNO<sub>3</sub>,流速 0.9 mL/min,柱温 45 °C,进样量为 20 μL。

### 1.3.9 戊聚糖红外光谱分析

红外光谱扫描范围为 400~4 000 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为 32 次,分辨率为 2 cm<sup>-1</sup>。

### 1.3.10 戊聚糖黏度的测定

以超纯水作为溶剂,将戊聚糖样品配制成质量分数为 4% 的溶液。设定测试温度为 20 °C,剪切速率为 0~300 s<sup>-1</sup>,扫描时间为 60 s,扫描模式为线性扫描。测定剪切速率变化时,不同加工工艺条件下戊聚糖溶液的黏度变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同加工工艺对戊聚糖得率的影响

不同加工工艺条件下戊聚糖样品得率变化情况如图 1。从图 1 中可以看出,未处理、挤压和微波-挤压处理黑小麦麸皮所得水溶性戊聚糖得率分别为 1.13%、2.76% 和 7.14%,水不溶性戊聚糖得率分别为 4.63%、3.67% 和 4.18%。与 WEAX 相比,E-WEAX、ME-WEAX 得率分别提高了 1.44 倍和 5.32 倍;与 WUAX 相比,E-WUAX、ME-WUAX 得率略微下降。这是由于在挤压和微波-挤压作用下,水

不溶性戊聚糖发生降解,一部分水不溶性戊聚糖转化为水溶性戊聚糖,使水溶性戊聚糖得率提高。相比未处理组戊聚糖的总得率(5.76%),挤压、微波-挤压工艺组戊聚糖总得率(6.43%、11.32%)分别是未处理组的 1.12 倍和 1.97 倍。由结果可知,黑小麦麸皮经微波-挤压加工处理后,戊聚糖溶出率最高,且水溶性戊聚糖含量也增加最多,优于挤压加工工艺。

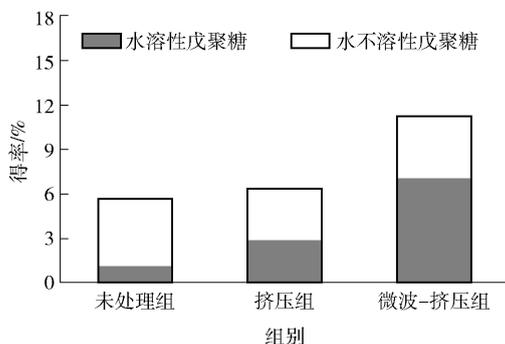


图 1 不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖得率  
Fig. 1 Yields of pentosans from black-grained wheat bran by different processing techniques

### 2.2 不同加工工艺对戊聚糖组成的影响

不同加工工艺条件下所得戊聚糖样品的组成分析结果如表 1。由表 1 可知,与未处理组 WEAX 相比,E-WEAX 和 ME-WEAX 的多糖含量升高,戊聚糖含量下降。这主要是由于以水为溶剂提取得到的水溶性戊聚糖主要含有蛋白质及少量淀粉,再加上挤压、微波-挤压工艺处理会破坏麸皮致密的细胞壁组织结构,促进细胞内溶物的溶出,使可溶性物质含量增加<sup>[11]</sup>,相应戊聚糖含量占比减少。与未处理组 WUAX 相比,E-WUAX 和 ME-WUAX 多糖和戊聚糖含量均略有下降,且 ME-WUAX 中多糖和戊聚糖含量均高于 E-WUAX。由表 1 可以看出,各水不溶性戊聚糖组分的戊聚糖纯度明显高于水溶性戊聚糖组分,表明用饱和 Ba(OH)<sub>2</sub> 溶液提取黑小麦麸皮戊聚糖,Ba<sup>2+</sup> 可以特异性地与 Ara 和 Xyl 等戊糖结合,使戊聚糖更易溶出<sup>[12]</sup>。

表 1 中单糖组成结果显示,不同戊聚糖组分均由 Ara、Xyl 和 Glc 组成,并含有少量 Gal。对于水溶性戊聚糖组分,WEAX、E-WEAX、ME-WEAX 的分支度(Ara/Xyl)逐步降低,分别为 0.74、0.66、0.59,表明黑小麦麸皮水溶性戊聚糖经挤压、微波-挤压加工工艺处理后位于分支的 Ara 发生了降解。WEAX、E-WEAX、ME-WEAX 的 Glc 与 Ara 的

摩尔比分别为 1.66:1、4.28:1、5.49:1,表明黑小麦麸皮随挤压、微波-挤压加工工艺处理后,戊聚糖组分中的 Glc 含量持续增加。Glc 含量变化的主要原因是由于挤压、微波-挤压加工工艺破坏了麸皮细胞壁组织中戊聚糖、 $\beta$ -葡聚糖等半纤维素之间的共价结合,并加剧了麸皮中纤维素的降解,使 Glc 含量大幅提高。

表1 不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖的组成

Tab.1 Composition of pentosans from black-grained wheat bran by different processing techniques

样品	$w(\text{多糖})/\%$	$w(\text{戊聚糖})/\%$	单糖组成(物质的量比)				分支度(Ara/Xyl)
			阿拉伯糖 Ara	木糖 Xyl	葡萄糖 Glc	半乳糖 Gal	
WEAX	50.42	46.40	1	1.35	1.66	0.25	0.74
E-WEAX	52.34	42.81	1	1.52	4.28	0.18	0.66
ME-WEAX	72.90	42.81	1	1.68	5.49	0.12	0.59
WUAX	82.35	80.96	5.85	8.39	1	0.47	0.70
E-WUAX	72.77	62.42	1	1.29	1.86	0.09	0.77
ME-WUAX	76.60	75.12	1	1.26	1.61	0.11	0.79

## 2.3 不同加工工艺对戊聚糖理化性质的影响

### 2.3.1 对戊聚糖中结合态阿魏酸含量的影响

采用高效液相色谱法分析了各戊聚糖样品中结合阿魏酸的含量,分析结果见图2。从图2可见,未处理、挤压和微波-挤压处理黑小麦麸皮所得水溶性戊聚糖结合态阿魏酸质量分数分别为 1760.73、2094.51、1951.88  $\mu\text{g/g}$ ,水不溶性戊聚糖结合态阿魏酸质量分数分别为 601.24、1331.58、1813.35  $\mu\text{g/g}$ 。经比较可以看出,3组水不溶性戊聚糖样品中的结合态阿魏酸含量均低于水溶性戊聚糖样品,这是由于提取水不溶性戊聚糖所用碱性溶液会破坏阿魏酸与戊聚糖的酯键结合,使阿魏酸游离<sup>[13]</sup>。与未处理组水不溶性戊聚糖相比,挤压和微波-挤压处理所得水不溶性戊聚糖中阿魏酸的含量逐渐增加,分别提高了 1.44 倍和 5.32 倍。挤压和微波-挤压处理所得戊聚糖样品中的阿魏酸总含量均高于未处理组,且微波-挤压组阿魏酸的总含量(3765.23  $\mu\text{g/g}$ )高于挤压组(3426.09  $\mu\text{g/g}$ )。

### 2.3.2 对戊聚糖相对分子质量的影响

不同加工工艺条件下各戊聚糖组分的相对分子质量参数如表2。可以看出,WEAX 由  $M_w$  为  $6.72 \times 10^5$  和  $2.93 \times 10^3$  的两部分组成,峰面积所占比例为 70.53%、29.47%。黑小麦麸皮经挤压工艺处理后,E-WEAX 的高  $M_w$  组分所占比例由

对于水不溶性戊聚糖组分,WUAX 组分主要由 Ara 和 Xyl 组成,仅含有少量 Glc;而 E-WUAX、ME-WUAX 组分中 Glc 的含量相比 WUAX 有所增加,其变化趋势与水溶性戊聚糖组分相似。WUAX、E-WUAX、ME-WUAX 的分支度(Ara/Xyl)分别为 0.70、0.77、0.79,表明黑小麦麸皮经挤压、微波-挤压工艺处理后所得水不溶性戊聚糖的分支度逐步增加。

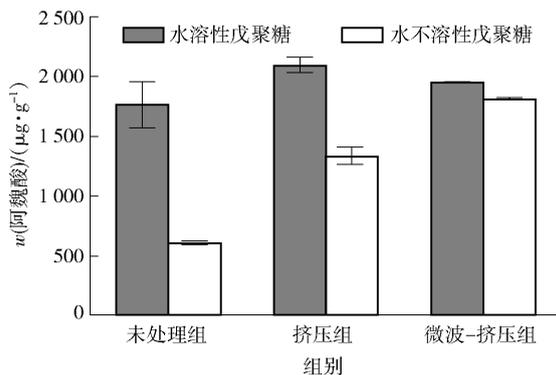


图2 不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖中结合阿魏酸的含量

Fig.2 Content of conjugated ferulic acid obtained from pentosans by different processing techniques of black-grained wheat bran

70.53% 降低到 40.71%,低  $M_w$  组分比例由 29.47% 增加到 59.29%,表明挤压工艺处理后 E-WEAX 组分的  $M_w$  有所下降。黑小麦麸皮经微波-挤压工艺处理后,ME-WEAX 组分的  $M_w$  持续下降至  $3.15 \times 10^5$ ,且  $M_w$  分布由双峰变成单峰, $M_w$  分布较集中。

未处理组水不溶性戊聚糖 WUAX 由  $M_w$  为  $8.80 \times 10^5$  和  $2.41 \times 10^3$  的两部分组成,峰面积所占比例分别为 77.72%、22.28%;E-WUAX 组分  $M_w$  由 3 部分组成,高低  $M_w$  所占比例为 54.92% 和

表2 不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖的相对分子质量

Tab. 2  $M_w$  of pentosans obtained from black-grained wheat bran by different processing techniques

样品		$M_w$	峰面积占比/%
WEAX	峰1	$6.72 \times 10^5$	70.53
	峰2	$2.93 \times 10^3$	29.47
E-WEAX	峰1	$7.92 \times 10^5$	40.71
	峰2	$1.87 \times 10^4$	59.29
ME-WEAX	峰1	$3.15 \times 10^5$	100.00
WUAX	峰1	$8.80 \times 10^5$	77.72
	峰2	$2.41 \times 10^3$	22.28
E-WUAX	峰1	$9.79 \times 10^5$	54.92
	峰2	$4.28 \times 10^3$	23.74
	峰3	$5.10 \times 10^2$	21.34
ME-WUAX	峰1	$3.17 \times 10^5$	100.00

峰面积占比是指单个峰占总峰的比例。

45.08% (23.74% + 21.34%), 表明挤压工艺处理使不溶性戊聚糖  $M_w$  下降。与 E-WUAX ( $9.79 \times 10^5$ ) 组分相比, ME-WUAX 的  $M_w$  下降更明显,  $M_w$  为  $3.17 \times 10^5$ 。本实验结果表明, 挤压、微波-挤压加工处理促使高  $M_w$  戊聚糖组分中部分糖苷键发生断裂, 降解为低  $M_w$  组分<sup>[14-15]</sup>, 且微波-挤压工艺促使戊聚糖  $M_w$  下降的幅度高于挤压工艺。

### 2.3.3 对戊聚糖红外光谱的影响

各戊聚糖组分的红外光谱如图3。由图3可知, 戊聚糖组分在波数为  $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$  时具有糖类的特征吸收峰。  $2400 \sim 3600 \text{ cm}^{-1}$  处较宽的吸收峰是分子内或分子间—OH 伸缩振动的结果;  $2931 \text{ cm}^{-1}$  和  $1402 \text{ cm}^{-1}$  处吸收峰分别为—CH 的伸缩振动吸收峰和—CH 弯曲振动吸收峰;  $1746 \text{ cm}^{-1}$  处有一个吸收峰, 为阿魏酰酯键的特征吸收峰。从图3中可以清晰地看到, 经挤压、微波-挤压工艺处理所得戊聚糖样品在  $1746 \text{ cm}^{-1}$  处存在特定吸收, 而未处理组在此处吸收很弱, 这是由于挤压、微波-挤压工艺处理后戊聚糖  $M_w$  降低、溶解性增加, 使阿魏酸相对含量增加, 阿魏酰酯键的吸收增强;  $1657 \text{ cm}^{-1}$  和  $1543 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 C=O 的伸缩振动; 指纹区 ( $1000 \sim 1300 \text{ cm}^{-1}$ ) 的吸收峰则是 C—O 伸缩振动所引起。  $899 \text{ cm}^{-1}$  处有一个吸收峰, 是吡喃  $\beta$  型 C—H 弯曲振动的特征吸收峰, 在

$848 \text{ cm}^{-1}$  附近存在微弱的吡喃  $\alpha$  型 C—H 弯曲振动的特征吸收峰, 说明戊聚糖中含有  $\alpha$ -糖苷键和  $\beta$ -糖苷键。

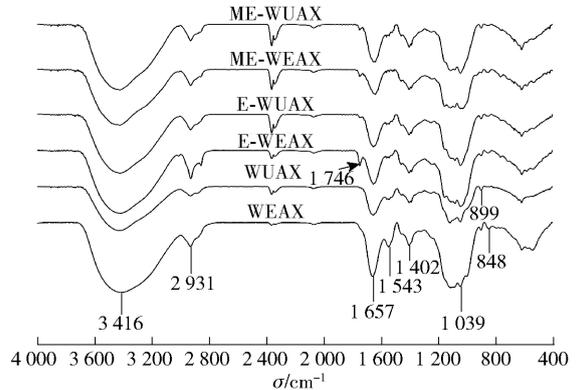


图3 不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖的红外光谱

Fig. 3 Infrared spectra of pentosans obtained from black-grained wheat bran by different processing techniques

### 2.3.4 不同加工工艺对戊聚糖黏度的影响

不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖溶液的黏度变化情况如图4。可以看出, 相同剪切速率下, 不同加工工艺对黑小麦戊聚糖溶液的黏度影响很大。图4显示, 未处理组水不溶性戊聚糖 WUAX 的黏度最高, 经挤压、微波-挤压加工处理后, E-WUAX、ME-WUAX 的黏度持续下降, 这是由于不同加工工艺处理使戊聚糖  $M_w$  降低, 黏度随之降低。3种水溶性戊聚糖的黏度均较低, 且微波-挤压加工处理后 ME-WEAX 的黏度均低于 WEAX、E-WEAX。

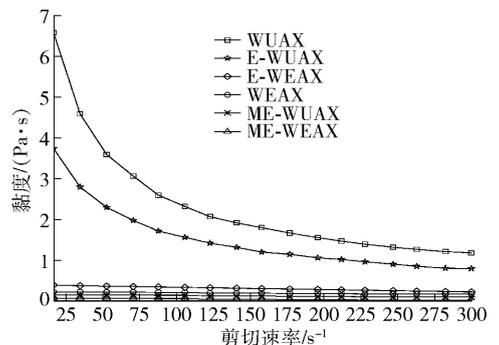


图4 不同加工工艺处理黑小麦麸皮所得戊聚糖的黏度

Fig. 4 Viscosity of pentosans obtained from black-grained wheat bran by different processing techniques

### 3 结 论

1) 采用挤压、微波-挤压加工工艺处理黑小麦麸皮,促使水不溶性戊聚糖降解为水溶性戊聚糖,所得戊聚糖的总得率逐步增加,分别是未处理组的1.12倍、1.97倍。

2) 黑小麦麸皮戊聚糖样品主要由 Ara, Xyl, Glc 和少量 Gal 组成。麸皮经挤压、微波-挤压加工处理后,各戊聚糖样品中 Glc 含量增加,且水溶性戊聚糖分支度持续降低,水不溶性戊聚糖分支度持续增加。

3) 挤压、微波-挤压处理使戊聚糖的  $M_w$  和黏度逐步下降,结合态阿魏酸含量增加,且微波-挤压组结合阿魏酸的总含量(3 765.23  $\mu\text{g/g}$ )高于挤压组(3 426.09  $\mu\text{g/g}$ )。采用挤压、微波-挤压加工工艺处理黑小麦麸皮,有助于提高戊聚糖得率,增加水溶性戊聚糖的含量,可以进一步改善戊聚糖的理化性质。

#### 参考文献:

[1] 裴自友,孙玉,孙善澄,等. 中国黑小麦研究利用现状[J]. 种子, 2002(4): 42-44.  
PEI Z Y, SUN Y, SUN S C, et al. Current status of research and utilization of triticale in China [J]. Seed, 2002(4): 42-44.

[2] ROUBROEKS J P, ANDERSSON R, MAN P. Structural features of (1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 4)- $\beta$ -glucan and arabinoxylan fractions isolated from rye bran [J]. Carbohydrate Polymers, 2000, 42: 3-11.

[3] SARMAA S M, SINGHA D P, SINGHA 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.

[4] ZHAO L, ZHANG F, DING X, et al. Gut bacteria selectively promoted by dietary fibers alleviate type 2 diabetes [J]. Science, 2018, 359: 1151-1156.

[5] DORNEZ E, GEBRUERS K, DELCOUR J A, et al. Grain-associated xylanases: occurrence, variability, and implications for cereal processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(11): 495-510.

[6] SAULNIER L, MAROT C, CHANLIAUD E, et al. Cell wall polysaccharide interactions in maize bran [J]. Carbohydrate Polymers, 1995, 26(4): 279-287.

[7] 张惟杰. 糖复合物生化研究技术[M]. 2版. 杭州: 浙江大学出版社, 1998:85-88.  
ZHANG W J. Biochemical research technology of sugar complex [M]. 2nd Edition. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1998:85-88.

[8] 河南工业大学. 谷物中戊聚糖含量的测定 分光光度法:NY/T 2335—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013:1-3.

[9] 赵梦丽. 小麦阿拉伯木聚糖益生与免疫调节活性研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.  
ZHAO M L. Study on the probiotics and immunomodulatory activity of wheat arabinoxylan [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.

[10] 孙元琳, 陕方, 刘惠芳, 等. 黑小麦麦麸多糖的制备与分析[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(6): 94-97.  
SUN Y L, SHAN F, LIU H F, et al. Preparation and analysis of rye wheat bran polysaccharides [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(6): 94-97.

[11] 房岩强, 杨海莺, 谢天, 等. 膳食纤维挤压改性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(2): 141-146.  
FANG Y Q, YANG H Y, XIE T, et al. Research progress in extrusion modification of dietary fiber [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(2): 141-146.

[12] 孙元琳, 李文多, 张生万, 等. 黑小麦麦麸戊聚糖的提取、纯化与组成分析 [J]. 中国食品学报, 2010, 10(5): 54-59.  
SUN Y L, LI W D, ZHANG S W, et al. Extraction, purification and composition analysis of black wheat bran pentosan [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(5): 54-59.

[13] 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(4): 784-789.

[14] SWENNEN K, COURTIN C M, LINDEMANS G C, et al. Large-scale production and characterisation of wheat bran arabinoxyloligosaccharides [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(11): 1722-1731.

[15] FADEL A, PLUNKETT A, ASHWORTH J, et al. The effect of extrusion screw-speed on the water extractability and molecular weight distribution of arabinoxylans from defatted rice bran [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(3): 1201-1206.

# Effect of Processing Technology on Composition and Physicochemical Properties of Pentosans from Black-Grained Wheat Bran

SUN Yuanlin<sup>1</sup>, TIAN Yurong<sup>2</sup>, LIU Rui<sup>1</sup>, WANG Chenxing<sup>1</sup>

(1. *Department of Life Sciences/Shanxi Key Laboratory of Characteristic Agro-Products Processing, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;*

2. *Shanxi Food Research Institute (Co Ltd), Taiyuan 030024, China)*

**Abstract:** Black-grained wheat bran, as the research subject, was processed by extrusion and microwave-extrusion processing techniques to extract water-soluble and water-insoluble pentosans, and ion chromatography, high performance liquid chromatography and rheometer were used to analyze the changes in the composition and physicochemical properties of pentosans under different processing conditions. After treatment with extrusion or microwave-extrusion, the results showed that the yields of water-soluble pentosans were increased, while the yields of water-insoluble pentosans decreased, and the yields of total pentosans were increased from 5.76% to 6.43% and 11.32%, respectively. The monosaccharide of pentosans consisted of arabinose, xylose, glucose and trace of galactose. Extrusion or microwave-extrusion treatment increased the glucose content, gradually decreased the branch degree of water-soluble pentosans and gradually increased the branch degree of water-insoluble pentosans. The relative molecular mass and viscosity of pentosans gradually decreased following the processing technology, and the content of bound ferulic acid was increased significantly. The study showed that using extrusion and microwave-extrusion processing technology to treat black-grained wheat bran could contribute to increase the yields of pentosans, increase the content of water-soluble pentosans, and further improve the physical and chemical properties of pentosans.

**Keywords:** black-grained wheat bran; pentosan; extrusion; microwave-extrusion; physicochemical properties

(责任编辑:叶红波)