

全麦粉水不溶性戊聚糖碱法提取工艺的研究

马福敏¹, 徐美玲¹, 郭小瑞¹, 郭乃菲¹, 单舒筠¹, 鲍士宝²

(1. 辽宁中医药大学药学院, 辽宁大连 116600;

2. 安徽科技学院食品药品学院, 安徽凤阳 233100)

摘要:全麦粉中水不溶性戊聚糖(water unextractable pentosan, WUP)含量较普通面粉高,因此 WUP 与面筋蛋白之间的相互作用对面团的流变性质及全面面包等产品有较大的影响。本研究以全麦粉为原料,研究了其中水不溶性戊聚糖的碱法提取工艺,应用响应面分析法进行了工艺优化,最佳提取工艺条件为:料水比 1:188(g/mL),温度 65℃,提取时间 3h,提取率达 31.87%。在最佳工艺条件下得到的提取物总糖,戊聚糖及糖醛酸含量分别为 95.33%,92.09%及 3.24%。

关键词:全麦粉,水不溶性戊聚糖,碱法提取,响应面分析

Study on the extracting process of water unextractable pentosan of wheat

MA Fu-min¹, XU Mei-ling¹, GUO Xiao-rui¹, GUO Nai-fei¹, SHAN Shu-jun¹, BAO Shi-bao²

(1. Food Science and Engineering Teaching and Research Section, School of Traditional Medicine, Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, Dalian 116600, China;

2. College of Food and Durges, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: There was more water infusibility pentosan in whole meal flour than in ordinary. WUP and protein had stronger interaction with each other, and the interaction affected dough rheological properties and bread. The extracting process of wholemeal flour water infusibility pentosan by alkali method was studied. The process was optimized by response surface methodology (RSM) and the optimum condition was determined as that when the ratio of solid to liquid, temperature and time were 1:188 (g/mL), 65℃ and 3h respectively. The product obtained under that condition contains 95.33% of total sugar, 92.09% of pentosan and 3.24% of uronic acid.

Key words: whole meal flour; water unextractable pentosan; extraction; response surface methodology

中图分类号: TS210

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2013)03-0269-05

小麦是一种特殊的加工主食面包的原料,其特殊性一方面归因于面筋蛋白。因为和面时,面筋蛋白形成弹性网络结构,具有较强的持气能力^[1]。然而,面粉中的另一种成分——戊聚糖(其中主要是水不溶性戊聚糖, water unextractable pentosan, WUP)含量虽然较面筋蛋白低,但可吸收相当于自身重量 3.5~10 倍的水^[2]。另外, Izydorczyk 等证明 WUP 可稳定蛋白质泡沫,减少蛋白质膜的热损伤^[3]。Wang 等认为 WUP 与面筋蛋白存在直接或间接的相互作用^[4-6]。所以 WUP 对面团及面包的性质产生重要的影响。随着人们对 WUP 应用领域的不断扩大,人们对其组成及结构有了不断深入的了解。通常认为 WUP 是由吡喃木糖单元通过 β -(1→4)糖苷键连接的主链, C(O)2 和(或) C(O)3 位上连接阿拉伯呋喃糖侧链构成^[7-8]。有些阿拉伯糖侧链还通过酯键与

阿魏酸等酚酸相连。WUP 与水溶性戊聚糖的差别在于其具有相对大的分子量及高的 A/X 值^[9]。WUP 的这种线性结构使其呈棒状,可水化形成粘稠的水溶液^[10]。由于 WUP 与纤维素等细胞壁物质紧密连接,因此较水溶性戊聚糖难以与细胞壁其他成分分离。目前主要采用碱法提取水不溶性戊聚糖。常用的碱有 NaOH、Ca(OH)₂、Ba(OH)₂ 等。郑学玲等^[11]对前两者提取麸皮中 WUP 进行了工艺优化。结果表明,以 NaOH 为溶剂时,在最佳条件下,提取率较低(<11%)。为了研究 WUP 结构与功能之间的关系,应首先建立一种高效的提取方法。全麦粉中 WUP 含量较普通面粉高,因此 WUP 与面筋蛋白之间的相互作用对面团的流变性质及全面面包等产品有较大的影响。在全麦粉这样复杂的体系中要研究其中的某种成分,通常是将这种成分提取出来,先进行单一成分功能性质的研究,然后在实际体系(即全麦面团或全麦面包)中,研究其它成分对它的影响。从全麦粉中提取 WUP 与其他原料(麦麸)相比,应首先将淀粉、脂肪及面筋蛋白等去除,而后从得到的粗提

收稿日期: 2012-03-26

作者简介: 马福敏(1977-),女,博士,讲师,研究方向:功能因子的开发与利用。

物中提取 WUP。本研究选择以上三种碱进行提取效果的比较,选择最合适的碱,并优化提取工艺,以确定水不溶性戊聚糖的最佳提取条件。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

全麦粉 中粮鹏泰面粉有限公司;间苯三酚、D-木糖 美国 Sigma 公司;葡萄糖 中国医药上海化学试剂公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS) 上海化学试剂公司;其他试剂均为分析纯;耐高温 α -淀粉酶 (2×10^4 IU/mL) 及高转化率糖化酶 (1×10^5 IU/mL)

无锡杰能科生物有限公司;碱性蛋白酶(Alcalase2 4L) (1×10^4 IU/mL) 丹麦诺维信(Novo)公司。

DGG-9070A 电热鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;722 分光光度计、DDS-11C 电导率仪

上海精密科学仪器有限公司;TG328A 电光分析天平 上海天平仪器厂;DELTA320 精密 pH 计 上海雷磁仪器厂;超级恒温器 上海市实验仪器厂;Sigma4K 15 高速冷冻离心机 德国;ZX98-1 旋转蒸发仪 中国科学院上海有机化学研究所;酶反应器自制;195LABCONO 冷冻干燥设备 英国。

1.2 实验方法

1.2.1 全麦粉中水不溶性戊聚糖粗提物制备工艺流程 工艺流程参考文献[8-11]并加以调整。

200g 小麦粉(灭酶) + 1000mL 水 \rightarrow 室温搅拌 1h \rightarrow 离心 (3600r/min, 15min) \rightarrow 残渣 + 600mL 水 \rightarrow 调节 pH 至 6.0, 加热煮沸至完全糊化 \rightarrow 耐高温 α -淀粉酶搅拌 \rightarrow 冷却到 60 $^{\circ}$ C, pH 调到 4.2 \rightarrow 加入高转化率糖化酶 \rightarrow 100 $^{\circ}$ C 下灭酶 10min \rightarrow 离心 (8000r/min, 20min) \rightarrow 残渣 + 600mL 水 \rightarrow 60 $^{\circ}$ C 恒温, pH 调至 9.0 \rightarrow 加入碱性蛋白酶 \rightarrow 100 $^{\circ}$ C 灭酶 10min \rightarrow 反复离心至上清液清澈为止 \rightarrow 冷冻干燥 \rightarrow 水不溶性戊聚糖粗提物 (crude water unextractable pentosan, CWUP)

1.2.2 CWUP 中 WUP 的提取方法 工艺流程参考文献[12-13]并加以调整。

在酶反应器中加入 CWUP 2.0g, 加入碱溶液, 当超级恒温水浴锅中水的温度升高到设定的温度时, 搅拌反应, 调节 pH 至 7.0, 离心后取上清液, 真空浓缩, 透析直至透析液的导电率小于 $2.5 \times 10^2 \mu\text{s}/\text{cm}$ (与去离子水的导电率相当), 冷冻干燥, 得到 WUP。

1.2.3 分析方法

1.2.3.1 总糖含量的测定 采用苯酚-硫酸法^[14]。标准曲线方程: $y = 0.0039x - 0.0032$ ($R^2 = 0.999$)。按公式(1)计算总糖含量:

$$\text{总糖含量}(\%) = \frac{C \times D}{W} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: C-标准曲线中查得葡萄糖的含量(mg); D-样液的稀释倍数; W-样品的质量(mg)。

1.2.3.2 戊聚糖含量的测定 地衣酚-盐酸法^[15]。标准曲线方程如下: $y = 0.003x - 0.0182$ ($R^2 = 0.9955$)。根据公式(2)计算戊聚糖含量:

$$\text{戊聚糖含量}(\%) = \frac{\mu \times 0.88}{m} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: μ -标准曲线中查得的木糖含量(mg); 0.88-木糖换算为阿拉伯木聚糖的系数; m-样品的质

量(mg)。

1.2.3.3 糖醛酸含量的测定 硫酸-咔唑试剂法^[16]。标准曲线方程为 $y = 0.0007x - 0.0048$ ($R^2 = 0.9996$)。按式(3)计算糖醛酸的质量分数:

$$\text{糖醛酸}(\%) = \frac{\text{AUA 含量} \times N \times 250}{m \times 10^6} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: AUA 含量-从标准曲线上查的数据(μg); N-稀释倍数; m-样品质量(g)。

1.2.3.4 水分含量的测定 105 $^{\circ}$ C 烘箱法, 参照 GB/T 5009.3-2003。

1.2.3.5 蛋白质含量的测定 微量凯氏定氮法, 参照 GB/T 5009.5-2003。

1.2.3.6 灰分的测定 马弗炉灰化法, 参照 GB/T 5009.4-2003。

1.2.4 实验方案的设计 全麦粉过 110 μm 筛后, 经耐高温 α -淀粉酶及高转化率糖化酶水解除去淀粉, Alcalase2 4L 碱性蛋白酶水解除去蛋白质, 水洗得到 WUS 中主要为小麦麸皮, 其中含有大量的 WUP。将 WUS 加入碱液提取。对三种碱液、提取时间、提取温度及料液比进行单因素实验。在料水比为 1:50(g/mL), 提取时间是 3h, 分别在 40、50、60、70、80 $^{\circ}$ C 下考察温度对 WUP 提取率的影响; 在温度为 60 $^{\circ}$ C, 提取时间为 3h, 分别在料水比(g/mL) 为 1:50、1:75、1:100、1:150、1:200 及 1:250 条件下考察料液比对 WUP 提取率的影响; 在温度为 60 $^{\circ}$ C, 料水比为 1:150(g/mL) 时, 提取时间分别为 1、2、3、4、5h 时考察提取时间对 WUP 提取率的影响, 以确定最佳的提取工艺条件范围。

根据单因素实验, 对碱法提取 WUP 条件, 采用响应面方法进行优化。以料液比(A)、碱提温度(B)和提取时间(C)3 个因素作为自变量, 以 WUP 提取率(Y)为响应值, 根据 Box-Behnken 中心组合设计原理, 设计 3 因素 3 水平的响应面分析实验 (Response Surface Methodology, RSM), 因素水平见表 1。

表 1 RSM 实验因素及水平表

Table 1 Independent variables and levels of RSM

水平	因素		
	A 料水比 (g/mL)	B 温度 ($^{\circ}$ C)	C 提取时间 (h)
-1	1:75	40	1
0	1:150	60	3
1	1:250	80	5

1.2.5 提取率的计算 提取率计算公式如式 4:

$$\text{提取率}(\%) = \frac{m_{\text{WUP}}}{m_{\text{CWUP}}} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

式中: m_{WUP} 为水不溶性戊聚糖的质量(g); m_{CWUP} 为水不溶性戊聚糖粗提物的质量(g)。

2 结果与分析

2.1 水不溶性戊聚糖提取的单因素实验

2.1.1 碱对水不溶性戊聚糖提取效果的影响 小麦中 WUAX 与细胞壁物质如木质素及纤维素等通过氢键及共价键紧密结合形成微晶区, OH^- 可使纤维素溶胀, 使氢键断裂, 并可水解纤维素与 WUP 之间以 FA 基团连接的酯键, 使 WUP 游离出来, 进而与不溶性的纤维素及木质素等分离^[17]。

本研究使用不同的碱对全麦粉中 WUP 进行提取,并对提取率进行比较,结果见表 2。

表 2 不同的碱对 WUP 提取的影响

Table 2 Effect of alkali on WUP extracting

碱	提取率 (%)	戊聚糖含量 (%)
0.2mol/L NaOH	6.78 ± 0.43	67.30 ± 1.29
0.5mol/L NaOH	33.00 ± 0.51	58.09 ± 2.03
饱和 Ca(OH) ₂	25.00 ± 0.76	78.43 ± 1.62
饱和 Ba(OH) ₂	10.33 ± 0.59	92.0 ± 2.63

从表 2 中可以看出,以 NaOH 为提取溶剂时,0.5mol/L 浓度下提取率即可达到 33.0%,但提取物中 WUP 含量只有 58.09% 左右。当以饱和 Ca(OH)₂ 和 Ba(OH)₂ (含 0.26mol/L NaBH₄) 作溶剂时,与 0.5mol/L NaOH 相比,提取率下降,但 WUP 含量大幅度提高。这是由于 NaOH 不仅可提取 WUP,也将细胞壁的主要成分纤维素及少量的葡聚糖一同提取出来。研究表明二价阳离子的存在对于 WUP 的选择性提取非常重要^[18-19]。室温下(26℃)Ca(OH)₂ 饱和溶液溶解度很低,并且溶解度随温度的升高而下降,其浓度不足以溶出大量细胞壁中的 WUP。但 Ba(OH)₂ 作溶剂能克服上述缺点,Cyran 等^[20] 研究表明 Ba²⁺ 可与细胞壁中的 β-葡聚糖作用形成不溶于 Ba(OH)₂ 饱和溶液的物质,可通过离心除去。大大提高了 WUAX 的提取效率。此外,溶液中加入 NaBH₄ 一方面可提高 Ba(OH)₂ 对 WUP 的选择性,另一方面可防止溶解在碱溶液中的 WUP 发生降解。

因此本实验选用饱和 Ba(OH)₂ (含 0.26mol/L NaBH₄) 作溶剂提取,并对此提取工艺作进一步的优化。

2.1.2 温度对提取率的影响 料水比为 1:50 (g/mL),提取时间是 3h,分别在 40、50、60、70、80℃ 下提取 WUP,结果见图 1。

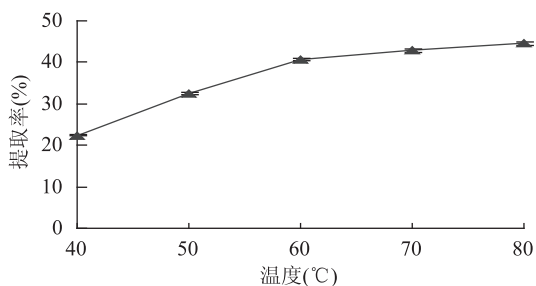


图 1 温度对提取率的影响

Fig.1 Influence of temperature on extraction yield

由图 1 可以看出,随温度的升高,提取率随之增大,当温度为 60℃ 时,提取率增加最为明显,继续提高温度,提取率增加幅度减小。

2.1.3 料水比对提取率的影响 温度为 60℃,提取时间为 3h,分别在料水比为 1:50、1:75、1:100、1:150、1:200、1:250 (g/mL) 条件下提取戊聚糖,结果见图 2。

从图 2 可以看出,随着水的增加,提取率得到很大提高。当料水比达到 1:150 (g/mL) 时,继续增加水含量对提取率的影响减小。这是因为随溶剂量增大,粗提物与溶剂接触界面处的浓度差增大,从而传质速率提高,提取率增大。当料水比为 1:150

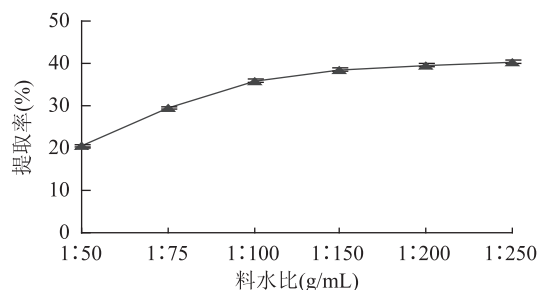


图 2 料水比对提取率的影响

Fig.2 Influence of the ratio of liquid to solid on extraction yield

(g/mL) 时,再增加溶剂用量,提取率基本保持不变。另外,从节省资源,减少污染的角度考虑,应尽量降低饱和 Ba(OH)₂ 的用量。

2.1.4 提取时间对提取率的影响 温度为 60℃,料水比为 1:150 (g/mL) 时,提取时间分别为 1、2、3、4、5h 时提取戊聚糖,以确定最佳的提取工艺条件。结果见图 3。

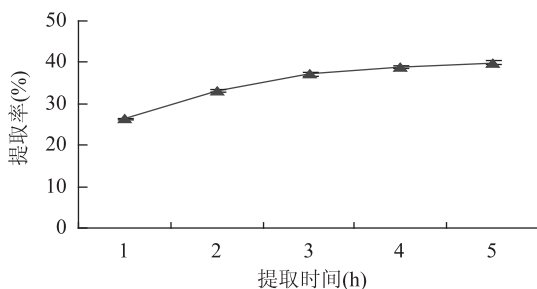


图 3 提取时间对提取率的影响

Fig.3 Influence of time on extraction yield

根据液固萃取基本理论,延长提取时间将有利于溶质的提取,从图 3 可以看出当提取时间小于 3h 时,随着提取时间的延长提取率随之增加,且增加幅度较大,这是因为提取时间过短,溶剂与粗提物还没有充分的接触,所以增加提取时间有利于提取率的提高。提取时间到达 3h 时,提取率增幅减小,可见在 3h 内提取过程基本完成,时间对提取率的影响减小。

2.2 工艺优化

2.2.1 实验设计 综上分析选取如下水平值进行工艺优化,用 Design Expert 软件进行工艺优化实验设计,实验结果如表 3 所示。

由软件拟合得到回归方程如下: $Y = 31.12 + 2.03A + 2.52B + 0.65C + 1.51AB - 0.40AC - 0.87BC - 3.81A^2 - 10.47B^2 - 6.25C^2$,从回归方程可以看出,温度对戊聚糖的提取率影响最大,料水比次之,而提取时间影响最小。由交互项的系数可以看出提取温度和料水比的影响较大。这一结果与方差分析结果一致。

2.2.2 各因素的交互作用对 WUP 提取率的影响 通过多元回归方程所做的响应曲面图及其等高线图(图 4~图 6),所拟和的响应曲面和等高线图能比较直观的反映各因素和各因素间的交互作用,由图 4~图 6 可以看出,3 个响应曲面均为开口向下的凸

形曲面, A(料水比)、B(提取温度)和 C(提取时间)3个因素与 WUP 的提取率呈抛物线关系,且在考察范围内存在响应值(WUP 的提取率)的极高值。

表3 实验方案及实验结果

Table 3 Experiment design and results

实验号	A	B	C	提取率 Y(%)
1	0	0	0	32.23
2	0	-1	1	12.22
3	-1	-1	0	14.28
4	0	1	1	13.82
5	0	0	0	31.83
6	0	-1	-1	13.24
7	0	0	0	26.95
8	-1	0	-1	14.63
9	1	0	1	26.69
10	1	0	-1	22.14
11	-1	0	1	20.79
12	1	-1	0	12.69
13	0	1	-1	18.33
14	1	1	0	22.42
15	0	0	0	32.74
16	0	0	0	31.83
17	-1	1	0	17.99

图4为提取时间为3h时,料水比与提取温度的交互影响。从图中可以很直观的看出温度在60℃时,提取率在最高的范围内,当料水比达到1:150(g/mL)时,提取率达到最大值32.74%,料水比继续增加对提取率影响不大。当提取率为26.68%时,料水比需要提高一倍才能达到32.74%,而达到同样的提取率温度只需上升10℃,所以可以得出温度对提取率的影响更显著,从而可以通过控制温度来有效地减少料水比,节约原料。

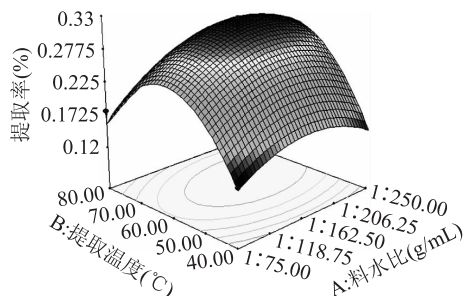


图4 料水比与提取温度对戊聚糖提取率的影响

Fig.4 Influence of the ratio of liquid and solid and temperature on extraction yield

图5为提取温度为60℃时,料水比与提取时间之间的交互关系。从图中可以看出,这两个因素的交互影响不是很显著,提取时间对提取率的影响大于料水比,在一定范围内,可以适当的提高提取时间,减少料水比,从而可以有效的节约原料。在料水比为1:150(g/mL),提取时间为3h时提取率最大。

图6为提取时间与提取温度对戊聚糖提取率的影响。适当增加料水比与提取时间有利于提高戊聚糖的提取率。这两个因素的交互影响也不显著,但是可以得出提取温度对提取率的影响大于提取时间,可以适当的控制提取的温度来减少提取时间,从

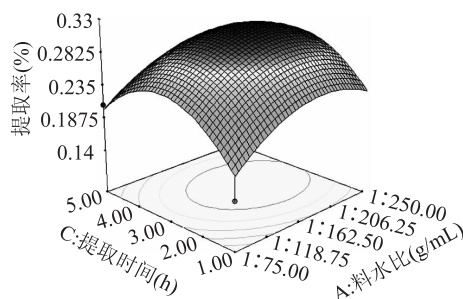


图5 料水比和提取时间对戊聚糖提取率的影响

Fig.5 Influence of the ratio of liquid and time on extraction yield

而提高单位时间戊聚糖的产量。在提取时间为3h,提取温度为62℃时得到最佳提取率32.74%。

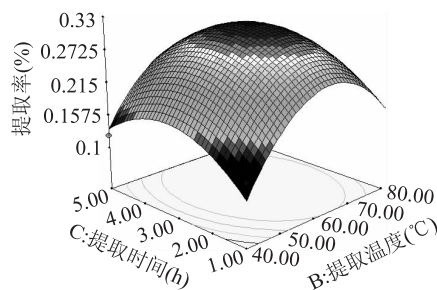


图6 提取温度与提取时间对戊聚糖提取率的影响

Fig.6 Influence of temperature and time on extraction yield

2.2.3 方差分析及提取率与过程参数回归方程的拟合 方差分析结果如表4。从表4可以看出,回归模型显著,失拟项不显著,说明模型拟合较好。各因素对提取率的影响依次为 B > A > C,即提取温度对提取率的影响最大,其次为料水比,提取时间对提取率的影响最小。模型的一次项不显著,而二次项显著,说明单个因素对提取率的影响不是简单的线性关系,二次项中提取温度高度显著,对提取率影响尤其大,这与拟合方程得到的结果一致。R² = 0.9191,说明该模型与实验数据拟合较好,可以用于提取戊聚糖的理论预示。

表4 方差分析

Table 4 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	Pr > F
回归模型	851.02	9	94.56	8.84	0.0045
A	33.01	1	33.01	3.09	0.1224
B	50.65	1	50.65	4.74	0.0660
C	3.35	1	3.35	0.31	0.5930
AB	9.06	1	9.06	0.85	0.3880
AC	0.65	1	0.65	0.061	0.8126
BC	3.05	1	3.05	0.28	0.6102
A ²	60.98	1	60.98	5.70	0.0483
B ²	461.17	1	461.17	43.11	0.0003
C ²	164.37	1	164.37	15.37	0.0058
残差	74.88	7	10.70		
失拟项	52.63	3	17.54	3.15	0.1481
总和	925.90	16			
R ²	0.9191				

综上所述,用响应面分析得到最佳提取工艺条

件为料水比 1:188.07 (g/mL), 温度 63℃, 提取时间 3h, 提取率为 31.60%。考虑到实际操作的局限性, 同时达到节省时间、节约试剂、提取效果好的目的, 提取工艺条件调整为: 料水比 1:188 (g/mL), 浸提温度 65℃, 浸提时间 3h。结果显示 WUP 的实际提取率为 31.87%, 与理论预测值基本一致。

2.3 提取物的主要成分

在最佳工艺条件下提取得到的提取物中戊聚糖含量的多少决定能否进行后续的纯化及戊聚糖功能性质的研究, 因此, 本研究对提取物中主要成分进行分析, 结果见表 5。

表 5 最佳工艺条件下提取物中主要成分的含量

Table 5 Components of the extractant extracted at the optimum condition

各种组分 含量 (%)	水	总糖	戊聚糖	糖醛酸	蛋白质	灰分
	0.50	95.33	92.09	3.24	1.09	2.54

由表 5 可以看出, 最佳工艺条件下得到的产品戊聚糖含量很高。在此条件得到的产物, 与用 NaOH 及 Ca(OH)₂ 最佳工艺条件下得到的产物相比, 戊聚糖含量提高了 12%~16%^[12], 大大提高了提取效率。

3 结论

通过不同的碱对 WUAX 的提取率以及产品戊聚糖含量比较, 发现 Ba(OH)₂ 的提取效果最好; 单因素实验结果表明, 温度为 60℃ 左右, 料水比为 1:150 左右, 时间为 3h 左右时, 小麦粉中戊聚糖提取率较大; 响应面分析得到 Ba(OH)₂ 提取戊聚糖的最佳工艺条件为: 料水比 1:188.07 (g/mL), 提取温度 63℃, 提取时间 3h, 提取率为 31.60%; 通过验证实验确定为料水比 1:188 (g/mL), 温度 65℃, 提取时间 3h 时, 提取率达 31.87%, 与理论预测值基本吻合。方差分析结果显示各因素对提取率影响的模型显著 ($p < 0.05$), 提取温度的平方项对提取率的影响高度显著 ($p < 0.001$); 最佳工艺条件下得到的提取物中总糖, 戊聚糖及糖醛酸含量分别为 95.33%、92.09% 及 3.24%。

参考文献

[1] Courtin C M, Delcour J A. Arabinoxylans and endoxylanase in wheat flour bread-making [J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35:225-243.

[2] 李利民, 侯业茂, 朱永义, 等. 谷物戊聚糖国内外研究进展 [J]. *粮油加工与食品机械*, 2002(5):36-38.

[3] Sarker D K, Wilde P J. Enhancement of protein foam stability by formation of wheat arabinoxylan-protein crosslinks [J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75:493-499.

[4] Wang M, Hamer R J. Effect of water unextractable solids on gluten formation and properties; mechanistic considerations [J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 37:55-64.

[5] Wang M, Oudgenoeg G. Interaction of water unextractable solids with gluten protein; effect on dough properties and gluten quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38:95-104.

[6] Wang M, Vliet T V. Interaction of water unextractable solids and xylanase with gluten protein; effect of wheat cultivar [J].

Journal of Cereal Science, 2005, 41:251-258.

[4] Bergmans M E F, Beldman G H, Gruppen, et al. Optimisation of the selective extraction of (Glucurono) arabinoxylans from wheat bran; use of barium and calcium hydroxide solution at elevated temperatures [J]. *Journal of Cereal Science*, 1996, 23:235-245.

[5] Barron C, Robert P, Fabienne G, et al. Structural heterogeneity of wheat arabinoxylans revealed by Raman spectroscopy [J]. *Carbohydrate Research*, 2006, 341:1186-1191.

[6] Gruppen H, Komelink F J M, Voragen A G J. Water-unextractable cell wall material from wheat flour. III. A structural model for arabinoxylans [J]. *Journal of Cereal Science*, 1993, 19:111-128.

[7] Izydorczyk M S, Biliaderis C G. Cereal arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1995, 28:33-48.

[8] Faurot A-L, Saulnier L, Brot S, et al. Large scale isolation of water-soluble and water-insoluble pentosans from wheat flour [J]. *Lebensm-Wiss u-Technol*, 1995, 28:436-441.

[9] 周素梅. 阿拉伯木聚糖在焙烤制品中的功能性质的研究 [D]. 无锡: 无锡轻工大学食品学院, 2000.

[10] Maes C, Delcour J A. Structural characterisation of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans in wheat bran [J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35:315-326.

[11] 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: 江南大学食品学院, 2002.

[12] Verbruggen M A, Beldman G, Voragen A G J. The selective extraction of glucuronoarabinoxylans from sorghum endosperm cell walls using barium and potassium hydroxide solutions [J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 21:271-282.

[13] Hollmann J, Lindhauer M G. Pilot-scale isolation of glucuronoarabinoxylans from wheat bran [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 59:225-230.

[14] 李建武. 生物化学实验原理与方法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1997:25-29.

[15] 周素梅, 王璋, 许时婴. 面粉中戊聚糖含量测定方法的探讨 [J]. *食品工业科技*, 2000, 21(6):70-72.

[16] 王璋, 许时婴. 食品化学 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006:33-52.

[17] Izydorczyka M S, MacGregor A W. Evidence of intermolecular interactions of β -glucans and arabinoxylans [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 41:417-420.

[18] Mandalari G, Faulds C B, Sancho A I, et al. Fractionation and characterisation of arabinoxylans from brewers' spent grain and wheat bran [J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42:205-212.

[19] Huisman M M H, Schols H A, Voragen A G J. Glucuronoarabinoxylans from maize kernel cell walls are more complex than those from sorghum kernel cell walls [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 43:269-279.

[20] Cyran M, 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 Agriculture and Food Chemistry*, 2004, 52(9):2671-2680.