

# 高营养全谷物燕麦浓浆的复合酶解工艺优化

刘先隆<sup>1</sup>, 刘磊<sup>2</sup>, 赖婷<sup>2</sup>, 魏振承<sup>2</sup>, 马永轩<sup>2</sup>, 张名位<sup>2</sup>

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东广州 510631)(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

**摘要:** 本研究先比较烘烤、挤压膨化、超微粉碎、耐高温 $\alpha$ -淀粉酶耦合挤压膨化四种不同前处理对燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量的影响; 再比较纤维素酶、酸性蛋白酶、中性蛋白酶、中温 $\alpha$ -淀粉酶四种酶对酶解燕麦 $\beta$ -葡聚糖和游离酚含量的影响。在单因素实验的基础上进行 Box-benhnken 中心组合实验设计, 以确定燕麦酶解最佳工艺。结果表明: 四种不同的前处理工艺均能显著提高可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量, 其中挤压膨化耦合耐高温 $\alpha$ -淀粉酶处理效果最佳。中性蛋白酶能显著提高燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量, 中性蛋白酶和中温 $\alpha$ -淀粉酶能显著提高燕麦中游离酚含量( $p < 0.05$ )。燕麦复合酶解的最佳条件确定为: pH 6.6, 51 °C, 持续时间 2 h, 料液比 1:8。在该酶解条件下, 燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量为 3.18±0.28 mg/g DW, 游离酚含量为 65.71±5.96 mg/100 g DW。本论文为开发富含可溶性 $\beta$ -葡聚糖和游离酚的燕麦饮料提供了有用的信息。

**关键词:** 燕麦; 酶解;  $\beta$ -葡聚糖; 游离酚; 工艺优化

文章篇号: 1673-9078(2018)07-196-204

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.7.029

## Optimization of Complex Enzymatic Hydrolysis of Highly Nutritious Whole Grain Oat Thick Paste

LIU Xian-long<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>2</sup>, LAI Ting<sup>2</sup>, WEI Zhen-cheng<sup>2</sup>, MA Yong-xuan<sup>2</sup>, ZHANG Ming-wei<sup>2</sup>

(1. College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** In this study, comparisons were made on the effects of four different pretreatments, baking, extrusion, ultrafine grinding, and thermostable  $\alpha$ -amylase coupled with extrusion, on the content of soluble  $\beta$ -dextran in oats, as well as the effects of four enzymes, cellulase, acidic protease, neutral protease and mesophilic  $\alpha$ -amylase on the hydrolysis of oats and resultant contents of soluble  $\beta$ -dextran and free phenols. The optimized hydrolysis process was established according to the Box-benhnken central composite design based on the single-factor experiments. The obtained results showed that the four pretreatment processes significantly increased the content of soluble  $\beta$ -dextran, with the treatment using thermostable  $\alpha$ -amylase coupled with extrusion leading to the greatest increase. The use of neutral protease significantly increased the content of soluble  $\beta$ -dextran in oats, while both neutral protease and mesophilic  $\alpha$ -amylase were able to facilitate significantly ( $p < 0.05$ ) increased free phenol content in oats. The optimum conditions for the complex enzymatic hydrolysis of oat paste were established (pH 6.6, 51 °C, duration 2 h, solid-liquid ratio, 1: 8). Under which, the contents of soluble  $\beta$ -dextran and free phenol in oat pastewere 3.18 ± 0.28 mg / g DW and 65.71 ± 5.96 mg / 100g DW, respectively. This paper provides useful information for the development of oat beverages enriched with soluble  $\beta$ -dextran and free phenols.

**Key words:** oat; enzymolysis;  $\beta$ -glucan; free phenol; process optimization

燕麦又称为野麦、雀麦, 是一种营养健康和医疗价值突出的谷物, 其含有丰富的 $\beta$ -葡聚糖、纤维素和

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0400702-2、2017YFD0401105); 广东省科技计划项目 (2016B020203004、2015A020209072、2017B090907022、2017A070702007)

作者简介: 刘先隆 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品

通讯作者: 张名位 (1967-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品

混合交联阿拉伯木聚糖等膳食纤维成分<sup>[1]</sup>, 还富含酚类化合物、不饱和脂肪酸、蛋白质、矿物质和维生素<sup>[2]</sup>。燕麦胚乳细胞壁多糖的一个重要结构是 $\beta$ -葡聚糖, 能降低血中胆固醇含量和血脂含量, 有效减缓糖尿病症状<sup>[3]</sup>, 其主要有葡萄糖分子以 $\beta$ - (1,4) 和 $\beta$ - (1,3) 糖苷键连接而成<sup>[4]</sup>。燕麦中的可溶性 $\beta$ -葡聚糖与人体内的 M 细胞、肠道细胞和集散控制系统有着非常密切的联系, 进而改善肠道免疫功能, 维持肠道稳态<sup>[5]</sup>。燕

麦中的酚类物质主要包括酚酸、燕麦蒽酰胺和类黄酮素等<sup>[6]</sup>, 已有大量研究表明酚类物质具有抗氧化活性, 可以预防慢性疾病, 具有降血糖、降血脂等生理功能<sup>[7]</sup>。

燕麦是富含可溶性 $\beta$ -葡聚糖的谷物, 目前已有许多关于燕麦加工的前处理工艺、风味的研究。已有报道证明, 酶解处理能提高谷物中的可溶性膳食纤维含量和游离酚含量<sup>[8,9]</sup>。因此, 可以利用酶解处理的方法来提高燕麦中的可溶性膳食纤维含量及游离酚含量, 从而更充分地提高燕麦中营养成分的生物利用率。陈中伟等<sup>[10]</sup>研究了 $\beta$ -葡聚糖和酚酸在燕麦麸皮(果皮+种皮+糊粉层)和胚乳中的分布, 发现 $\beta$ -葡聚糖富集在麸皮中, 达 8.57%, 约是胚乳中浓度的 4.5 倍; 麸皮中 *p*-香豆酸和阿魏酸的含量分别达 0.098 和 1.00 mg/g, 分别是胚乳中相应含量的 24 倍和 48 倍。蛋白质和淀粉及其他物质与纤维素相连接组成细胞壁, 降低了可溶性膳食纤维的含量<sup>[11]</sup>。付晓燕等<sup>[12]</sup>人采用中温 $\alpha$ -淀粉酶和有机溶剂提取燕麦多酚物质, 结果表明和有机溶剂提取法相比较, 经过中温 $\alpha$ -淀粉酶辅助提取的多酚提取率提高 58.38%。徐康<sup>[13]</sup>通过糖化酶和淀粉酶水解燕麦, 显著增加了燕麦饮料中可溶性固形物含量, 但没有考察燕麦酶解后酚类物质和 $\beta$ -葡聚糖的含量变化。

燕麦饮料的研制过程中发现, 燕麦浓浆不利于溶解, 而通过酶解处理能够很好的降低燕麦溶解的稠度, 还能提高燕麦的营养价值, 因此, 本研究比较了不同前处理后燕麦可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量的影响; 以游离酚含量和可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量为综合考察指标, 比较经不同酶处理对燕麦酶解效果的影响; 通过响应面实验设计优化, 以综合模糊评判值为指标, 燕麦复合酶解的工艺条件, 旨在为开发全谷物燕麦浓浆性饮料提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料与试剂

燕麦从广州市天河区的超市采购。 $\beta$ -葡聚糖标品、刚果红购买自广州市齐云生物技术有限公司; 没食子酸、福林酚试剂均购自美国 Sigma 公司; 中温 $\alpha$ -淀粉酶(100000 U/g, 最适 pH 6.5)、高温 $\alpha$ -淀粉酶(100000 U/g, 最适 pH 5.8~6.8)、酸性蛋白酶(50000 U/g, 最适 pH 3.0)、中性蛋白酶(50000 U/g, 最适 pH 7.0)、纤维素酶(5000 IU/g, 最适 pH 4.5)购自尤特尔生物技术有限公司, 等级均为食品级; 其它试剂均为国产分析纯。

### 1.2 主要仪器设备

UV-1800 型紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; Eylan-1100 旋转蒸发仪, 东京理化器械株式会社; TD6 离心机, 长沙湘智离心机仪器有限公司; M200 型多功能酶标仪, 瑞士 Tecan 科技有限公司; DS30-II 型双螺杆膨化机, 山东赛信膨化机械有限公司; XFB-1000 中药粉碎机, 吉首市中诚制药机械厂; XDW-6BI 超微粉碎机, 济南达微机械有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 不同前处理对燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量的影响

将燕麦磨成粉后过 60 目筛, 筛选出提取可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量最大的前处理工艺。条件如下:

(1) 烘烤工艺条件: 燕麦经 150 °C 烘烤 40 min 至呈现均匀黄色。烘烤时经常翻动燕麦, 使燕麦烘烤均匀并防止烤焦。燕麦烘烤后水分含量约为 5~6%。

(2) 挤压膨化工艺条件: 参考张冬媛<sup>[14]</sup>等人的方法并稍有改动。挤压膨化机前端、中端和末端温度分别 60 °C、95 °C 和 130 °C, 螺杆转速为 300 r/min。燕麦挤压烘烤之后水分含量约为 6%~7%。

(3) 高温 $\alpha$ -淀粉酶耦合挤压膨化工艺条件: 酶添加量为 0.3%, 挤压膨化条件同上。

(4) 超微粉碎工艺条件: 燕麦于超微粉碎机中粉碎时间为 60 s/次, 共 2 次, 温度-4 °C, 燕麦超微粉碎后水分含量约为 13%~15%。

#### 1.3.2 不同酶处理对燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖和酚含量的影响

以可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量为指标, 考察不同酶(酸性蛋白酶、中性蛋白酶、中温 $\alpha$ -淀粉酶和纤维素酶)处理燕麦中 $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量的影响。酶解前, 燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量分别为 2.12±0.02 mg/g DW 和 51.28±0.04 mg/100 g DW。酶解温度为 50 °C、酶解时间 2 h, 以下为不同酶的添加量:

(1) 中性蛋白酶添加量(pH=7)为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%。

(2) 酸性蛋白酶添加量(pH=3)为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%。

(3) 中温 $\alpha$ -淀粉酶(pH=6.5)为 0.05%、0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.3%。

(4) 纤维素酶(pH=4.5)为 0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.12%、0.14%。

#### 1.3.3 不同酶解条件对复合酶解燕麦中 $\beta$ -葡聚

## 糖和酚含量的影响

(1) 酶解温度: 设定酶解 pH 为 7, 酶解时间为 2 h, 料液比为 1:10, 酶解温度: 35 °C、40 °C、45 °C、50 °C、55 °C、60 °C。

(2) 酶解 pH: 设定酶解温度为 50 °C, 酶解时间为 2 h, 料液比为 1:10, 酶解 pH: 5.5、6、6.5、7、7.5、8。

(3) 酶解时间: 设定酶解温度为 50 °C, 酶解 pH 为 6.5, 料液比为 1:10, 酶解时间: 0.5、1、1.5、2、2.5、3。

(4) 料液比: 设定酶解温度为 50 °C, 酶解 pH 为 6.5, 酶解时间为 2 h, 料液比: 1:5、1:10、1:15、1:20、1:25、1:30。

## 1.3.4 复合酶酶解燕麦工艺优化试验

在单因素实验基础上, 选择影响显著的单因素 pH、温度、料液比和时间作为自变量,  $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量计算得到的模糊评判值为响应值, 设计响应面分析实验。其因素水平编码表见表 1。

## 1.3.5 计算模糊综合评判值 Y 的方法

参考李杨等<sup>[15]</sup>人方法。采用模糊综合评判法对燕麦复合酶酶解工艺进行双指标综合评判, 评价因素集  $U=\{\beta\text{-葡聚糖含量、游离酚含量}\}=\{Z_1、Z_2\}$ , 评价函数为 Y。

$Z_1、Z_2$  的函数关系如下:

$$Z_1(X_a) = \frac{Q_{1i}}{Q_{1\max}}; Z_2(X_b) = \frac{Q_{2\text{mix}}}{Q_{2i}} \quad (1)$$

将实验数据带入相应的评价函数, 得到评价矩阵,

评价函数 Y 为:

$$Y = \sum_{j=1}^2 \gamma_j Z_{ij} \quad (2)$$

注:  $Y_2$ -模糊评价结果;  $\gamma_j$ -权重系数;  $i=1, 2, 3, \dots, j$ -权重编号,  $j=1, 2$ 。

综合考虑实验指标的重要程度, 分配权重选取为  $\gamma=\{0.50, 0.50\}$ , 即  $\gamma_1$  表示游离酚含量权重系数,  $\gamma_1=0.50$ ,  $\gamma_2$  表示  $\beta$ -葡聚糖含量权重系数,  $\gamma_2=0.50$ 。

## 1.3.6 测定方法

1.3.6.1  $\beta$ -葡聚糖含量测定

参考张娟等<sup>[16]</sup>人的方法并稍做改动。称取 1 g 燕麦+10 mL 蒸馏水→搅拌均匀→70 °C 水浴 30 min→5000 r 离心 5 min→取上清液 1 mL+1 mL 蒸馏水+4 mL 刚果红溶液→室温下反应 10 min。蒸馏水做空白对照, 配制不同浓度梯度的  $\beta$ -葡聚糖标准品制作标准曲线。测定重复 3 次。刚果红溶液的配制方法: 称取 0.02 g 刚果红并溶解于 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液中 (pH=8), 定容至 200 mL。

## 1.3.6.2 游离态含量测定

参考 Xu 等人<sup>[17]</sup>的方法并稍做改动。准确称取 50 g 酶解液, 5000 r/min 离心 10 min, 取上清液定容至 50 mL, 然后用 6 mol/L 盐酸调 pH 至 3.0, 上清液用乙酸乙酯萃取 (1:2, V/V), 合并 5 次乙酸乙酯萃取相, 在 45 °C 条件下旋蒸至干, 用超纯水溶解残余物, 定容至 10 mL。取 0.125 mL 游离酚提取液装入 10 mL 试管中, 加入福林酚试剂 0.125 mL 和蒸馏水 0.5 mL, 混匀后在室温下静置反应 6 min, 之后加蒸馏水 1 mL 和 7% (m/V)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液 1.25 mL, 混匀后室温避光静置反应 90 min, 760 nm 处测定吸光值。采用不同浓度梯度的没食子酸标准品制作标准曲线, 重复测定 3 次。总酚含量以每 100 g 燕麦 (干基) 中所含没食子酸当量 (mg gallic acid equivalents/100 g dry weight) 表示, 简称为 mg GAE/100 g DW。

## 1.3.7 数据统计分析

采用 SPSS 19 软件检验分析比较实验各组间均值差异显著性 ( $p<0.05$ ), 响应面试验采用 Design expert 软件处理。

## 2 结果与分析

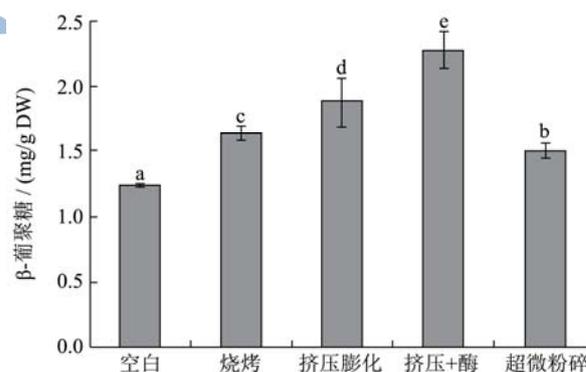
2.1 不同前处理对燕麦中可溶性  $\beta$ -葡聚糖含量的影响

图1 不同前处理工艺对燕麦中  $\beta$ -葡聚糖含量的影响

Fig.1 The effect of different pretreatment methods on the contents of  $\beta$ -glucan in oat

注: 不同字母表示组内显著性差异, 显著水平  $p<0.05$ 。

由图 1 可以看出, 空白组燕麦的可溶性  $\beta$ -葡聚糖含量为  $1.23 \pm 0.02$  mg/g DW, 经四种前处理后均显著提高可溶性  $\beta$ -葡聚糖含量 ( $p<0.05$ )。其中, 高温  $\alpha$ -淀粉酶耦合挤压膨化效果最好, 燕麦中可溶性  $\beta$ -葡聚糖含量增加 83.73%; 超微粉碎处理增长最低为 21.13%。四种前处理方式效果显著大小顺序为: 高温  $\alpha$ -淀粉酶耦合挤压膨化 > 挤压膨化 > 烘烤 > 超微粉碎。

## 2.2 不同酶处理对燕麦中 $\beta$ -葡聚糖和游离酚含量的影响

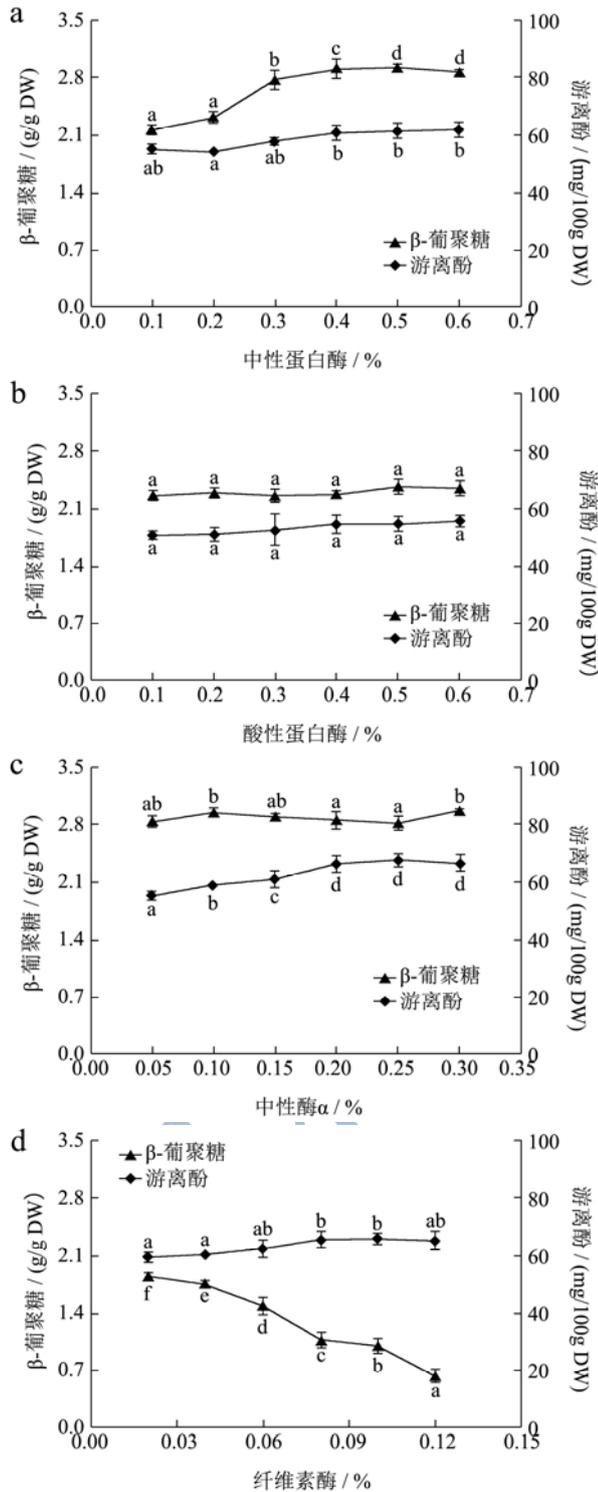


图2 不同酶处理对燕麦中  $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量的影响  
 Fig.2 The effect of different enzymes on the contents of  $\beta$ -glucan and free phenolics

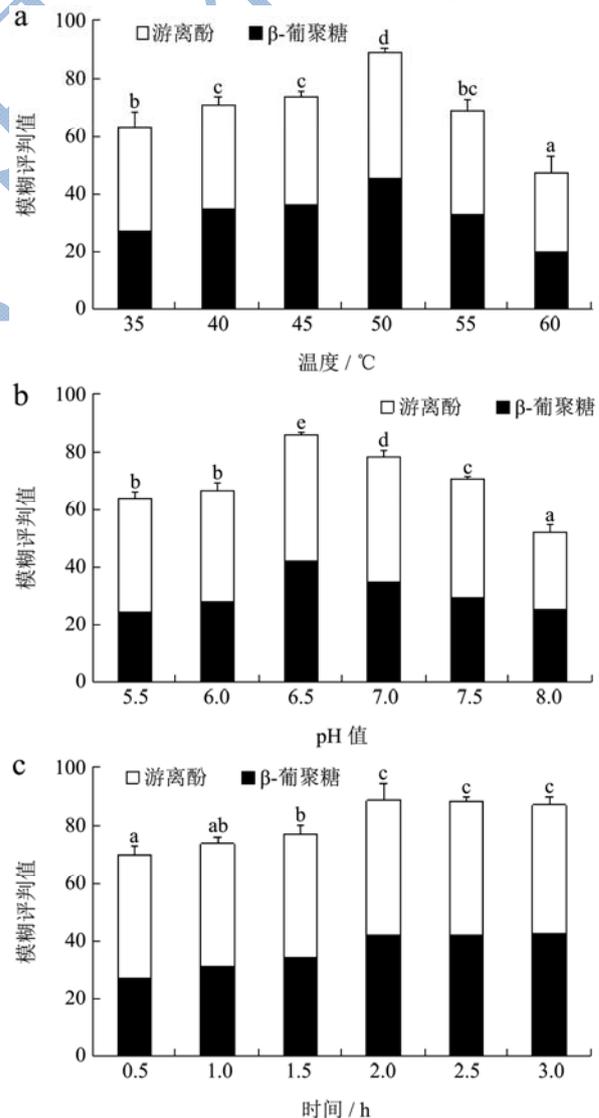
注: 图 a、b、c、d 分别表示中性蛋白酶、酸性蛋白酶、中温  $\alpha$ -淀粉酶、纤维素酶对燕麦中  $\beta$ -葡聚糖和游离酚含量的影

响; 不同字母表示组内显著性差异, 显著水平  $p < 0.05$ 。

由图2可以看出, 随着中性蛋白酶的增加, 燕麦中  $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量都逐渐增加, 添加量增加至0.4%维持稳定; 中温  $\alpha$ -淀粉酶增加时, 游离酚含量逐渐增加, 添加量至0.2%以后维持稳定,  $\beta$ -葡聚糖含量并无显著性变化, 综合模糊评判值呈上升趋势。添加酸性蛋白酶后  $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量并无显著性变化; 纤维素酶添加量的增加时燕麦中  $\beta$ -葡聚糖含量呈下降趋势, 综合模糊评判值呈持续下降趋势。

## 2.3 复合酶解条件对燕麦中 $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量的影响

由图3可知, 随着酶解温度的提高,  $\beta$ -葡聚糖含量呈先增加后降低的趋势; 游离酚含量在低温时稳定, 55  $^{\circ}\text{C}$ 后开始下降。温度为50  $^{\circ}\text{C}$ 时, 其模糊评判值最高为89.07, 因此最适酶解温度为50  $^{\circ}\text{C}$ 。在pH为6.5时, 其模糊评判值最高为85.63, 最适pH值为6.5。



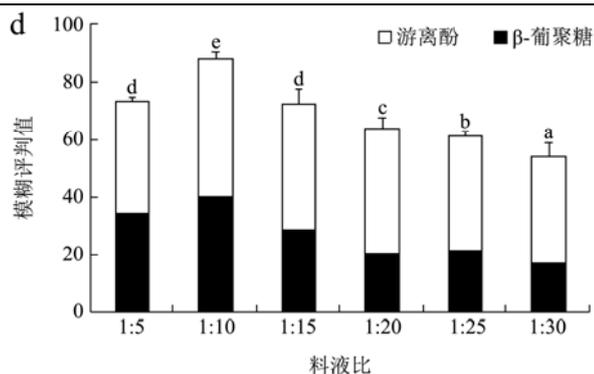


图3 燕麦复合酶解条件对β-葡聚糖含量和游离酚含量的影响

Fig.3 Effects of compound enzymolysis conditions on the β-glucan and free phenolics in oat

注: a、b、c、d 分别表示温度、pH、时间、料液比对燕麦酶解液模糊评判值的影响; 不同字母表示组内显著性差异, 显著水平  $p < 0.05$ 。

酶解时间延长后, β-葡聚糖含量和游离酚含量均逐渐增加, 2 h 时 β-葡聚糖含量和游离酚含量最高并保持稳定, 模糊评判值为 88.86, 因此最适酶解时间为 2 h。综合模糊评判值随加水比例的增加, 呈先增加后

降低的趋势, 在料液比为 1:10 时, 其模糊评判值最高为 88.26, 因此最适料比为 1:10。

## 2.4 燕麦复合酶解工艺响应面优化

### 2.4.1 优化方案与结果

$X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  和  $X_4$  分别表示 pH、温度、料液比和时间, 并以 -1、0、+1 代表各个因素的高、中、低水平。以 β-葡聚糖含量和游离酚含量计算得到的模糊评判值作为响应值 Y。因素水平编码表见表 1, 实验方案及结果见表 2。

表1 响应面设计中的实验因素和编码水平

Table 1 Experimental factors and coding levels in response surface design

水平	因素			
	pH	温度	料液比	时间
	$X_1$	$X_2/^\circ\text{C}$	$X_3$	$X_4/\text{h}$
-1	6	50	1:5	1.5
0	6.5	55	1:10	2
1	7	60	1:15	2.5

表2 响应面优化实验方案与结果

Table 2 The scheme and result of response surface optimization experiment

编号	pH	温度	料液比	时间	β-葡聚糖	游离酚	模糊评判值
1	0	0	0	0	3.50	640.48	89.30
2	1	0	1	0	2.75	504.76	70.32
3	0	-1	0	-1	2.63	562.62	72.91
4	0	-1	1	0	2.96	569.05	77.56
5	0	0	0	0	3.39	659.76	89.33
6	0	0	1	1	3.00	555.24	76.99
7	0	0	0	0	3.52	636.67	89.36
8	-1	-1	0	0	2.67	581.19	74.79
9	0	1	0	-1	2.91	618.33	80.37
10	0	0	-1	-1	2.77	593.33	76.92
11	0	0	-1	1	2.92	668.81	84.11
12	1	0	0	1	3.17	617.86	83.55
13	0	0	0	0	3.37	669.76	89.77
14	1	1	0	0	3.00	607.38	80.71
15	-1	0	1	0	2.71	552.38	73.16
16	1	0	0	-1	3.18	563.33	79.80
17	-1	0	0	-1	2.61	577.62	73.70
18	0	1	-1	0	2.98	660.95	84.25
19	-1	-1	0	0	2.71	547.86	72.83
20	0	-1	-1	0	2.77	575.95	75.68
21	1	0	-1	0	3.19	604.76	82.90
22	0	0	1	-1	2.81	571.67	75.79

转下页

接上页

23	0	1	0	1	2.95	561.90	76.91
24	0	1	1	0	2.93	595.00	78.99
25	0	-1	0	1	3.04	606.67	83.21
25	0	-1	0	1	3.04	606.67	83.21
26	1	-1	0	0	2.86	565.95	76.08
27	0	0	0	0	3.37	623.57	86.47
28	-1	0	0	1	2.77	574.05	75.54
29	-1	0	-1	0	2.49	590.71	73.24

### 2.4.2 响应面结果分析

通过响应面设计软件 design expert 8.06 进行数据分析, 建立二次响应面回归模型:

$$Y=88.85+2.51X_1+1.64X_2-2.02X_3+1.57X_4+0.67X_1X_2-3.31X_1X_3+0.48X_1X_4-1.78X_2X_3-2.94X_2X_4-1.50X_3X_4-7.28X_1^2-5.32X_2^2-5.61X_3^2-4.63X_4^2$$

注:  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ -因素水平编码值; Y-模糊评判值。

回归与方差分析结果见表 3。从表中可以看出, 回归模型  $p<0.0001$ , 说明回归模型达到极显著水平; 失拟项  $p=0.1902>0.05$ , 说明该模型是合适的。相关系数  $R^2=0.9415$ , 说明该二次回归方程能够很好地拟合各因素与模糊评判值之间的关系, 可利用该回归方程确定复合酶解燕麦的最佳工艺。对各项 F 值检验可知,

pH、温度、时间和料液比及其二次项均为显著影响因素 ( $p<0.05$ ), 温度与时间交互项和 pH 与料液比交互项  $p<0.01$ , 为极显著影响因素 (图 4 和图 5)。四个因素的贡献率顺序为: pH>料液比>温度>时间。

各因子临界优化结果见表 4, 将临界值优化结果带入方程 (3) 中模糊评判值为 89.74。

### 2.4.3 验证试验结果

由响应面优化结果可得知, 当 pH 为 6.6, 温度为 51 °C, 料液比为 1:8, 时间为 2 h 时, 预测模糊评判值为 89.74。经过三次验证实验  $\beta$ -葡聚糖含量为  $3.18\pm 0.28$  mg/g DW, 游离酚含量为  $65.71\pm 5.96$  mg/100 g DW, 模糊评判值为 86.49。与预测值间相对误差为 3.58%, 因此实际生产过程中应用该模型进行预测是可行的。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Results of regression and variance analysis

变异源	平方和	自由度	均方	F-值	P> F	显著性
模型 Model	854.38	14	61.03	16.08	< 0.0001	**
$X_1$ (pH)	75.5	1	75.5	19.9	0.0005	**
$X_2$ (温度)	32.47	1	32.47	8.56	0.0111	*
$X_3$ (料液比)	49.17	1	49.17	12.96	0.0029	**
$X_4$ (时间)	29.55	1	29.55	7.79	0.0145	*
$X_1X_2$	1.78	1	1.78	0.47	0.5043	
$X_1X_3$	39.06	1	39.06	10.29	0.0063	**
$X_1X_4$	0.91	1	0.91	0.24	0.6316	
$X_2X_3$	12.74	1	12.74	3.36	0.0882	
$X_2X_4$	34.63	1	34.63	9.13	0.0092	**
$X_3X_4$	8.97	1	8.97	2.36	0.1465	
$X_1^2$	343.35	1	343.35	90.48	< 0.0001	**
$X_2^2$	183.27	1	183.27	48.3	< 0.0001	**
$X_3^2$	204.45	1	204.45	53.88	< 0.0001	**
$X_4^2$	138.86	1	138.86	36.59	< 0.0001	**
残差	53.13	14	3.79			
失拟	45.92	10	4.59	2.55	0.1902	不显著
纯误差	7.2	4	1.8			
Cor Total	907.51	28				

注: \*代表  $p<0.05$ , 模型或考察因素有显著影响; \*\*代表  $p<0.01$ , 模型或考察因素有极显著影响。

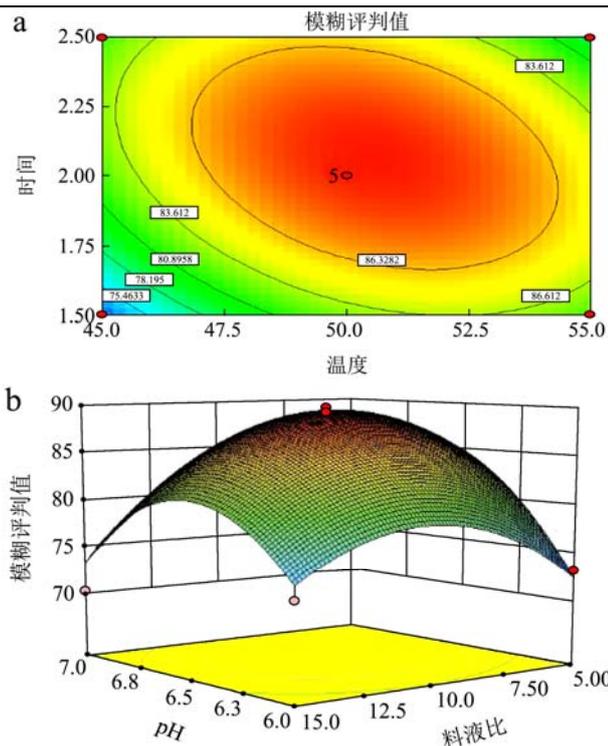


图4 pH与料液比的交互作用对酶解液中β-葡聚糖含量和游离酚含量的影响

Fig.4 Interaction of pH value and the solid-liquid ratio on the content of β-glucan and free phenolics in oat hydrolysate

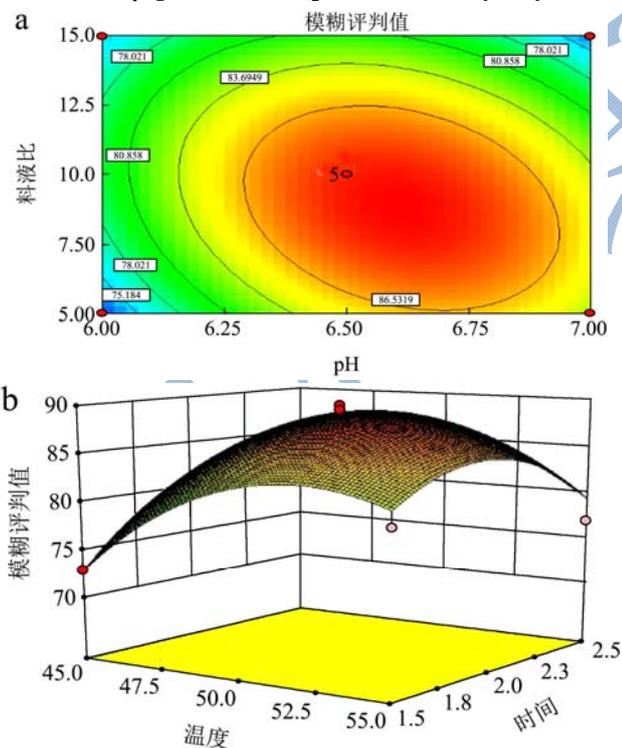


图5 温度与时间的交互作用对酶解液中β-葡聚糖含量和游离酚含量的影响

Fig.5 Interaction of temperature and time on the content of β-glucan and free phenolics in oat hydrolysate

表4 因子的临界值优化结果

Table 4 Critical value optimizations for factors

因子	水平编码值	实际值	调整值
X <sub>1</sub>	0.25	6.63	6.6
X <sub>2</sub> /°C	0.17	50.86	51
X <sub>3</sub>	-0.3	1:8.45	1:8
X <sub>4</sub> /h	0.18	2.09	2

### 3 结论

3.1 燕麦是一种有食用价值和医疗价值的的作物，有着重要的生理功能。宁鸿珍等<sup>[18]</sup>研究表明，燕麦β-葡聚糖可降低血液中血脂水平，调节脂质代谢的紊乱，减少氧自由基的生成，对于防止高脂血症诱发的动脉粥样硬化病变具有重要的意义。

3.2 目前，我国大部分燕麦主要被加工成为燕麦粉、燕麦片、燕麦饮料以及燕麦饼干，通过不同的加工方式和酶解方法提高燕麦营养成分含量和改善燕麦理化特性。汪丽萍等<sup>[19]</sup>研究发现，α-淀粉酶酶解燕麦后的浆中糖组分以葡萄糖和麦芽低聚糖为主，糖化酶酶解的燕麦浆中糖组分几乎全部为葡萄糖，α-淀粉酶酶解的浆液酶解效果和稳定性均优于使用糖化酶的浆液。王金华等<sup>[20]</sup>人发现挤压膨化处理大麦麸皮中可溶性β-葡聚糖提高28.35%。本研究结果表明，燕麦经烘烤、挤压膨化、α-高温淀粉酶耦合挤压膨化和超微粉碎处理均能显著提高可溶性β-葡聚糖含量。有文献报道，燕麦中存在内源β-葡聚糖酶（如内切β-1,3-葡萄糖苷酶等），能使β-葡聚糖在提取时被降解<sup>[21]</sup>。烘烤和挤压膨化处理由于高温使内源β-葡聚糖酶失活，从而提高可溶性β-葡聚糖的含量。

3.3 为解决高营养燕麦溶解后浓浆粘稠度高，不利于燕麦饮料营养价值最大化和口感舒适，本研究从中性蛋白酶、酸性蛋白酶、中温α-淀粉酶、纤维素酶四种酶比较酶解燕麦效果，结果表明，中性蛋白酶能显著提高燕麦中可溶性β-葡聚糖含量(p<0.05)。其原因可能在于中性蛋白酶的作用下，蛋白质分解使细胞壁结构破坏，释放出可溶性的膳食纤维。申瑞玲<sup>[22]</sup>等人通过在乙醇中加入蛋白酶来提高燕麦β-葡聚糖的提取率，发现β-葡聚糖的提取率随蛋白酶添加量的增加而增加，这与本研究结果一致。

3.4 燕麦具有抗氧化和抗炎的生理功能。近年来研究报道燕麦可降低患冠心病、糖尿病和癌症的风险<sup>[23,24]</sup>。其主要功能成分除具有丰富的β-葡聚糖外，还富含酚类抗氧化物，如以游离态或结合态存在的阿魏酸、咖啡酸、香豆酸和香草醛等<sup>[25]</sup>。武娇等<sup>[26]</sup>研究发

现利用微波加热提取可以显著提高燕麦麸皮中的总多酚的提取效率,提取物具有较强的抗氧化活性。本研究表明,随中温 $\alpha$ -淀粉酶和纤维素酶添加量的增加其游离酚含量显著提高( $p < 0.05$ )。马永强<sup>[27]</sup>等人利用纤维素酶酶解蓝莓果浆,酶解后发现花色苷的含量提高2.17倍,总酚含量提高1.95倍。其原因可能在于纤维素酶和中温 $\alpha$ -淀粉酶对燕麦细胞壁上的纤维素和淀粉进行了水解,进而释放出结合的酚类物质。因此,纤维素酶和中温 $\alpha$ -淀粉酶酶解燕麦后,燕麦中游离酚含量上升。

3.5 本研究采用可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量和游离酚含量为综合指标建立模糊综合评判模型,优化确定了燕麦经挤压膨化耦合 $\alpha$ -高温淀粉酶前处理,再经中性蛋白酶和中温 $\alpha$ -淀粉酶(2:1)复合酶解的工艺条件。在此条件下燕麦中可溶性 $\beta$ -葡聚糖含量为 $3.18 \pm 0.28$  mg/g DW,游离酚含量为 $65.71 \pm 5.96$  mg/100 g DW,本研究可以为开发高营养全谷物燕麦浓浆饮料提供指导。

## 参考文献

- [1] Luana N, Rossana C, Antonio J, et al. Manufacture and characterization of a yogurt-like beverage made with oat flakes fermented by selected lactic acid bacteria [J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 185(33): 17-26
- [2] Gupta S, Cox S, Nissreen A G. Process optimization for the development of a functional beverage based on lactic acid fermentation of oats [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 52(2): 199-204
- [3] Pasquale R, Maria LV, Vittorio C, et al. Lactobacillus plantarum strains for multifunctional oat-based foods [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 288-294
- [4] Pentikäinen A, Karhunen L, Flander L, et al. Enrichment of biscuits and juice with oat  $\beta$ -glucan enhances postprandial satiety [J]. Appetite, 2014, 75: 150-156
- [5] 程朝阳,莫树平,柏建玲,等.我国谷物饮料研究进展与生产概况[J].饮料工业,2012,15(6):6-10  
CHENG Zhao-yang, MO Shu-ping, BAI Jian-ling, et al. A survey of research progress and production of cereal beverages in China [J]. Beverage Industry, 2012, 15(6): 6-10
- [6] Daou C, Zhang H, Harasym J, et al. Oat beta-glucan: its role in health promotion and prevention of diseases [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2012, 11(4): 355-365
- [7] 刘清,姚惠源.燕麦酚类抗氧化成分研究进展[J].粮食与油脂,2004,9:7-9
- [8] LIU Qing, YAO Hui-yuan. Reserch on phenolic antioxidants in oats [J]. Food and Grease, 2004, 9: 7-9
- [8] 徐匆.高膳食纤维谷物营养粉制备关键技术研究[D].南京:南京农业大学,2012
- [9] XU Cong. Study on the critical technic of SDF(soluble dietary fiber)-enriched cereal nutritional products [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural College, 2012
- [9] 付晓燕,吴茜,胡正浩,等.传统溶剂提取与酶辅助提取燕麦多酚工艺的优化与比较[J].食品工业科技,2012,33(24): 277-281
- [10] FU Xiao-yan, WU Qian, HU Zheng-hao, et al. Optimization and comparison of the solvent extraction and enzyme assistant extraction of oat phenols [J]. Food Industry Technology, 2012, 33(24): 277-281
- [10] 陈中伟,汪玲,牛瑞,等.裸燕麦米和燕麦粉加工所得麸皮中 $\beta$ -葡聚糖和酚酸的分布[J].食品科学,2017,09
- [11] CHEN Zhong-wei, WANG Ling, NIU Rui, et al. The distribution of  $\beta$ -glucan and phenolic acids in the oat bran from the processing of Avena nuda oat rice and oat flour [J]. Food Science, 1-8(2017-09-27)
- [12] 邵娟娟.豌豆皮水溶性膳食纤维的制备及性质研究[D].无锡:江南大学,2011
- [12] SHAO Juan-juan. Study on the preparation, characteristic and application of pea-hulls soluble dietary fiber [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011
- [13] 付晓燕,隋勇,谢笔钧,等.不同方法提取发芽燕麦酚类物质的含量、组成和抗氧化活性比较[J].食品工业科技,2014, 35(15):57-62
- [13] FU Xiao-yan, SUI Yong, XIE Bi-jun. Comparison of content, composition and antioxidant activity of germinated oat phenols by different extraction methods [J]. Food Industry Technology, 2014, 35(15): 57-62
- [14] 徐康.酶法制备燕麦乳饮料的工艺技术研究[D].广州:暨南大学,2010
- [14] XU Kang. Processing technologies of oats milk by enzyme hydrolysis [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2010
- [15] 张冬媛,邓媛元,张名位,等.发芽-挤压-淀粉酶协同处理对速食糙米粉品质特性的影响[J].中国农业科学,2015,48(4): 759-768
- [15] ZHANG Dong-yuan, DENG Yuan-yuan, ZHANG Ming-wei, et al. Effect of germination-extrusion-amylase assisted processing on quality properties of brown rice powder [J]. Chinese Agricultural Sciences, 2015, 48(4): 759-768
- [16] 李杨,江连洲,张兆国,等.模糊评判优化水酶法提取膨化大豆油脂和蛋白[J].农业工程学报,2010,26(2):375-380

- LI Yang, JIANG Lian-zhou, ZHANG Zhao-guo, et al. Fuzzy optimization of enzyme assistant aqueous for extracting oil and protein from extruded soybean [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 375-380
- [17] 张娟,杜先锋,饶砚琴.刚果红法测定燕麦中 $\beta$ -葡聚糖含量的研究[J].安徽农业大学学报,2007,34(1):23-26  
ZHANG Juan, DU Xian-feng, RAO Yan-qin. Measurement of  $\beta$ -glucan from oats by congo red [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2007, 34(1): 23-26
- [18] Xu L, Diosady L L. Rapid method for total phenolic acid determination in rapeseed/canola meals [J]. Food Research International, 1997, 30(8): 571-574
- [19] 宁鸿珍,齐啸,贾春媚,等.燕麦  $\beta$ -葡聚糖抗氧化及降血脂作用的研究[J].食品科技,2008,33(9):153-155  
NING Hong-zhen, QI Xiao, JIA Chun-mei, et al. Study on anti- peroxidation and blood lipids role of the oat beta-glucan [J]. Food Science and Technology, 2008, 33(9): 153-155
- [20] 汪丽萍,朱亚婧,冯叙桥,等.酶解工艺对燕麦浆稳定性和糖组分的影响[J].中国粮油学报,2015,30(3):12-18  
WANG Li-ping, ZHU Ya-jing, FENG Xu-qiao, et al. Influence of enzymatic hydrolysis processing on the stability and saccharide distribution of oats milk [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(3): 12-18
- [21] 王金华,张声华,膨化工艺对大麦麸皮中  $\beta$ -葡聚糖水溶性的影响[J].食品与机械,2003,1:23-25  
WANG Jin-hua, ZHANG Sheng-hua. Effects of extrusion cooking on the water-solubility of  $\beta$ -glucan from barley brands [J]. Food and Machinery, 2003, 1: 23-25
- [22] Aman P, Rimsten L, Adersson R, et al. Weight distribution of  $\beta$ -D-glucan in oat-based foods [J]. Cereal Chem., 2004, 81(3): 356-360
- [23] 申瑞玲,何俊,刘延奇,等.乙醇-酶和热水二步法提取燕麦  $\beta$ -葡聚糖工艺的研究[J].中国食品学报,2009,9(5):82-86  
SHEN Rui-ling, HE Jun, LIU Yan-qi, et al. Study on extraction technology of oat  $\beta$ -Glucan by two-steps method of ethanol-enzymatic and hot water [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2009, 9(5): 82-86
- [24] Meydani M. Potential health benefits of avenanthramides of oats [J]. Nutrition Reviews, 2009, 67(12): 731-735
- [25] Ren Yi, Yang Xiushi, Niu Xiwu, et al. Chemical characterization of the avenanthramide-rich extract from oat and its effect on D- galactose-induced oxidative stress in mice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(1): 206-211
- [26] Peterson D M. Oat antioxidants [J]. Journal of Cereal Science, 2001, 33: 115-129
- [27] 武娇,任祎,孙希平,等.微波辅助提取燕麦总酚及其抗氧化能力评价[J].中国农学通报,2015,31(7):229-234  
WU Jiao, REN Yi, SUN Xi-ping, et al. Measurement of phenolic compounds and assessment of antioxidant activity of oat bran by microwave-assisted extraction [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(7): 229-234
- [28] 马永强,李安,那治国,等.酶法提高蓝莓果花色苷与总酚溶出率的工艺条件研究[J].农产品加工,2012,4:48-53  
MA Yong-qiang, LI An, NA Zhi-guo, et al. Enzyme process to improve the dissolution rates of anthocyanins and total phenol in blueberry [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012, 4: 48-53