

# 玉米秸秆酶解制备阿魏酰聚糖

## Preperation of feruloylated saccharides from corn straw by enzymatic hydrolysis

尤梦竹<sup>1,2,3</sup> 陆 健<sup>1,2,3</sup> 蔡国林<sup>1,2,3</sup>

YOU Meng-zhu<sup>1,2,3</sup> LU Jian<sup>1,2,3</sup> CAI Guo-lin<sup>1,2,3</sup>

(1. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学粮食发酵工艺与技术  
国家工程实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学生物工程学院, 江苏 无锡 214122)

(1. The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**玉米秸秆经多级旋风磨机械预处理后物理结构发生改变,更易被相应的酶水解从而释放出阿魏酰聚糖。相同酶解条件下,多级旋风磨预处理后的秸秆的阿魏酰聚糖含量是粗秸秆的 3.34 倍;用商品复合酶 Validase TRL、HSP 6000 BG 和 Rapidase Smart Clear,木糖苷酶及阿拉伯呋喃糖苷酶分别酶解机械预处理后的玉米秸秆,Validase TRL 酶解效果最佳,阿魏酰聚糖得率为 1.46  $\mu\text{mol/g}$  玉米秸秆,是不加酶时的 3.48 倍;协同酶解的最优组合为 Validase TRL 100 U/g,木糖苷酶 50 U/g 和阿拉伯呋喃糖苷酶 50 U/g,该条件下阿魏酰聚糖的得率为 2.87  $\mu\text{mol/g}$ ;酶解液经大孔树脂分离纯化后,阿魏酰聚糖的回收率为 81.44%。

**关键词:**玉米秸秆;酶解;制备;阿魏酰聚糖

**Abstract:** Multi-stage cyclone grinding can be used to change the physical structure of corn straw, which can be degraded easier by enzymes to release feruloylated saccharides. By the same enzymatic hydrolysis, the content of feruloylated saccharides released from multi-stage cyclone grinding corn straw increased by 3.34 fold than that without pretreatment. Commercial complex enzymes, such as Validase TRL, HSP 6000 BG, Rapidase Smart Clear, xylosidase and arabinofuranosidase were used to hydrolyze multi-stage cyclone grinding corn straw, and it showed that Validase TRL had the best effect, and the yield of feruloylated saccharides was 1.46  $\mu\text{mol/g}$ , increased by 3.48 fold than that without hydrolysis. The best combination of synergy enzymatic hydrolysis was Validase TRL 100 U/g, xylosidase 50 U/g and arabinofuranosidase 50 U/g, and the highest

yield of feruloylated saccharides was 2.87  $\mu\text{mol/g}$ . After the hydrolysat was pured by macroreticular resin, the recovery of feruloylated saccharides reached 81.44%.

**Keywords:** corn straw; enzymatic hydrolysis; preparation; feruloylated saccharides

玉米秸秆主要成分为纤维素(37%左右)、半纤维素(24%左右)、木质素(18%左右)及灰分等<sup>[1]2</sup>,其中木质素与半纤维素通过共价键结合,将纤维素包埋其中。纤维素的可及表面积与结晶度、木质素的屏障作用、纤维素与半纤维素的缠绕等因素阻碍了玉米秸秆的充分利用<sup>[2]</sup>。对秸秆进行预处理的主要目的是打破其木质纤维素结构<sup>[1]3</sup>。如何充分地提高玉米秸秆综合利用水平,变废为宝,提高玉米秸秆附加值,已成为国内外学者的研究热点。

阿魏酰聚糖是阿魏酸(ferulic acid, FA)通过酯键与不同聚合度的糖结合在一起形成的化合物,兼具二者的生理功能,如清除自由基<sup>[3][4]2</sup>、降血压<sup>[5]</sup>、降血脂<sup>[6]</sup>、抗血栓<sup>[7]</sup>和抗菌抗病毒<sup>[4]2</sup>等。由于其中特殊酯键的存在,使阿魏酰聚糖具有双亲媒性和非离子属性,渗透性强,容易进入线粒体而发挥作用<sup>[8]</sup>,从而使得一些生理功能有所增强。目前,常用的阿魏酰聚糖的提取方法有酸水解法、酶水解法及高温蒸煮法等,如林其龄等<sup>[9]</sup>用稀盐酸水解玉米麸皮制得阿魏酰低聚糖,姚惠源等<sup>[10]</sup>用木聚糖酶酶解麦麸制得阿魏酰低聚糖, Rachel 等<sup>[11]</sup>分别用三氟乙酸和崩潰酶从麦草中制得阿魏酰低聚糖, Nobuaki 等<sup>[12]</sup>用热处理的方式从甜菜纤维中制得阿魏酰低聚阿拉伯糖。但是,以玉米秸秆为原料,从中提取阿魏酰聚糖的研究尚未见报道。通过酶解玉米秸秆制备阿魏酰聚糖,首先要解决的是玉米秸秆的细胞壁屏障的破解问题。目前,汽爆、氨化和稀酸等预处理方法通过改变或移除阻碍水解的因素,使得半纤维素和纤维素对酶的可及性提

**基金项目:**国家 973 项目(编号:2013CB733602);江苏高校优势学科建设工程资助项目

**作者简介:**尤梦竹,女,江南大学在读硕士研究生。

**通讯作者:**陆健(1968—),男,江南大学教授。

E-mail: jlu@jiangnan.edu.cn

**收稿日期:**2016-02-14

高,从而提高酶解效率,但同时产生了大量的游离阿魏酸,不利于阿魏酰聚糖的制备。王璐璐等<sup>[13]</sup>通过球磨预处理玉米秸秆,使其粒径减小,纤维素结晶度下降,比表面积增大,酶解效率提高,但可能由于球磨处理工艺复杂、能耗过高,暂未见大规模应用。玉米秸秆中以木聚糖为主链的半纤维素含量较丰富,利用纤维素酶破坏纤维素与半纤维素的缠绕,使得木聚糖酶更好地降解木聚糖长链,阿拉伯糖苷酶则能降解木糖主链上的阿拉伯糖侧枝,使木聚糖酶更好地发挥作用,而木糖苷酶则能进一步将木聚糖长链水解成低聚木糖。

本研究拟以玉米秸秆为原料,比较多级旋风磨机械预处理对酶法制备阿魏酰聚糖的影响,考察不同商品酶对玉米秸秆制备阿魏酰聚糖的影响及协同效应,采用大孔吸附树脂对酶解液进行分离纯化,制备阿魏酰聚糖,以期为提高玉米秸秆的综合利用水平和附加值提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验仪器

真空冷冻干燥机:Science-10N 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

高速冷冻离心机:Centrifuge 5417R 型,Eppendorf(艾本德)中国公司;

高效液相色谱仪:Agilent 1260 型,美国安捷伦公司;  
电子天平:PL2002/EL204 型,梅特勒—托利多仪器有限公司;

凯氏定氮仪:DT260 型,福斯赛诺分析仪器有限公司;  
旋转蒸发仪:IKA RV10 型,上海楚柏实验室设备有限公司。

### 1.2 材料

玉米秸秆(约 5~10 mm,中性洗涤纤维含量为 69%左右,酸性洗涤纤维含量为 45%左右)和多级旋风磨预处理秸秆:嘉兴市壹零生物科技有限公司;

商品复合酶 Validase TRL、Rapidase Smart Clear、HSP 6000 BG:主要酶活见表 1,帝斯曼(中国)有限公司;

木糖苷酶和阿拉伯呋喃糖苷酶:主要酶活见表 1,湖南奥驰生物科技有限公司;

葡萄糖、木糖、木聚糖、阿魏酸等标准品:美国 Sigma 公司

甲醇:色谱纯,美国 Sigma 公司;  
氢氧化钠、浓盐酸、柠檬酸、磷酸氢二钠、无水乙醇、冰醋酸等常规试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 酶活测定

- (1) 木聚糖酶酶活测定:按 GB/T 23874—2009 执行。
- (2) 纤维素酶酶活测定:按 GB/T 23881—2009 执行。
- (3) 阿魏酸酯酶酶活测定:参考文献<sup>[14]</sup>,以去淀粉麦麸为底物进行测定。

1.3.2 多级旋风磨预处理对酶解效率的影响 准确称取粗玉米秸秆样品及经多级旋风磨处理后的秸秆样品各 0.20 g,缓冲液为柠檬酸—磷酸氢二钠缓冲液(pH5.0),底物浓度为

表 1 试验相关酶的主要酶活  
Table 1 Different enzymatic activities of experiment related hydrolytic enzymes

| 酶的种类                 | 木聚糖酶酶活                  | 纤维素酶酶活     | 阿魏酸酯酶酶活   |
|----------------------|-------------------------|------------|-----------|
| Validase TRL         | 952.0 U/mL              | 167.0 U/mL | 22.5 U/mL |
| Rapidase Smart Clear | 98.6 U/g                | 0.5 U/g    | 51.0 U/g  |
| HSP 6000 BG          | 6.7×10 <sup>3</sup> U/g | 未检出        | 24.0 U/g  |
| 木糖苷酶                 | 9.8×10 <sup>4</sup> U/g | 188.0 U/g  | 7.6 U/g   |
| 阿拉伯呋喃糖苷酶             | 250.0 U/g               | 18.4 U/g   | 7.1 U/g   |

10 g/L,添加 Validase TRL 100 U/g 底物(以木聚糖酶酶活计),50 ℃酶解 5 h,测定阿魏酰聚糖的含量。

1.3.3 不同商品酶对阿魏酰聚糖得率的影响 准确称取 6 组多级旋风磨预处理后的样品,分别加入 Validase TRL、Rapidase Smart Clear、HSP 6000 BG、木糖苷酶或阿拉伯呋喃糖苷酶,酶添加量为 100 U/g,底物浓度为 10 g/L,以不加酶的样品为空白对照,50 ℃酶解 5 h,测定阿魏酰聚糖的含量。

1.3.4 底物浓度对阿魏酰聚糖得率的影响 准确称取 6 组多级旋风磨预处理后的样品,使底物浓度分别为 5,10,15,20,25,30 g/L,Validase TRL 添加量为 100 U/g,50 ℃酶解 5 h,测定阿魏酰聚糖的含量。

1.3.5 酶解时间对阿魏酰聚糖得率的影响 准确称取 6 组多级旋风磨预处理后的样品,Validase TRL 添加量为 100 U/g,底物浓度为 10 g/L,于 50 ℃分别酶解 5,10,15,20,25,30 h,测定阿魏酰聚糖的含量。

1.3.6 协同酶解对阿魏酰聚糖得率的影响 准确称取 8 组多级旋风磨预处理后的样品,底物浓度为 10 g/L,在各自添加 Validase TRL 100 U/g 的基础上,分别加入木糖苷酶和/或阿拉伯呋喃糖苷酶 50 U/g 或 100 U/g(酶添加量的依据来源于每种酶的单独添加量试验),考察协同酶解对玉米秸秆制备阿魏酰聚糖的影响。具体酶解组合见表 2。

1.3.7 阿魏酰聚糖的制备 利用处理过的大孔树脂 D101 对酶解液进行动态吸附,再先后以 3 倍柱体积的水,3 倍柱体积的 10%乙醇溶液,3 倍柱体积的 20%乙醇溶液及 5 倍柱体积

表 2 不同组合酶的添加量  
Table 2 Different combinations of enzymes added U/g

| 试验组 | 木聚糖酶 | 阿拉伯呋喃糖苷酶 | Validase TRL |
|-----|------|----------|--------------|
| 1   | 100  | 0        | 100          |
| 2   | 50   | 0        | 100          |
| 3   | 0    | 100      | 100          |
| 4   | 0    | 50       | 100          |
| 5   | 100  | 100      | 100          |
| 6   | 100  | 50       | 100          |
| 7   | 50   | 100      | 100          |
| 8   | 50   | 50       | 100          |

的 50%乙醇溶液进行多级洗脱,上样流速为 1 mL/min,洗脱流速为 2 mL/min。测定不同洗脱液中阿魏酰聚糖含量。

1.3.8 阿魏酰聚糖的测定 以键合态 FA 的含量表征阿魏酰聚糖含量<sup>[15]</sup>。

(1) HPLC 分析条件:色谱柱:Zorbax Eclipse XDB-C<sub>18</sub> (250 mm×4.6 mm i.d.,5 μm)(Agilent 公司);流动相:含 0.1%乙酸的水溶液(A 相)和含 0.1%乙酸的甲醇溶液(B 相);梯度洗脱条件:0 min,5% B;15 min,20% B;45 min,60% B;50 min,80% B;52 min,5% B;60 min,5% B。紫外检测波长为 320 nm;柱温 25 ℃;流速 1 mL/min;进样量 20 μL。

(2) 使用 HPLC 分别检测游离 FA 及总 FA 含量:酶解结束后于 100 ℃煮沸灭酶 10 min,冷却后 6 000 r/min 离心 10 min 取上清,用 80%乙醇醇沉,上清液经微孔过滤(0.45 μm)后,检测其中游离 FA 含量;另取 15 mL 酶解上清液,加入 0.24 g NaOH,充分溶解后室温下避光反应 2 h,加入 0.75 mL 浓盐酸终止反应,醇沉后微孔过滤,检测其中总 FA 的含量。总 FA 含量与游离 FA 含量之差即为阿魏酰聚糖含量。

1.4 数据处理

所有试验均进行 3 次平行组测定,取平均值,采用 Excel 软件进行数据处理并作图。

2 结果与讨论

2.1 多级旋风磨预处理对酶解效率的影响

粗玉米秸秆粒径大小约 5~10 mm,经多级旋风磨预处理后粒径明显变小,70%集中在 100~500 μm,95%小于 1 000 μm。玉米秸秆的粒径减小,比表面积增大,酶的可及性增加,理论上可以提高酶解效率。

由图 1 可知,多级旋风磨处理后的样品酶解液中阿魏酰聚糖含量为 1.47 μmol/g,是相同酶解处理的粗秸秆(0.45 μmol/g)的 3.34 倍,酶解效率得到有效的提高。王璐璐等<sup>[13]</sup>和张麟等<sup>[16]</sup>采用球磨的方法分别对玉米秸秆和啤酒糟进行预处理,使原料的可溶性总糖分别提高了 2.2 倍和 3.3 倍,从而提高了酶解效率。本试验中通过多级旋风磨处理,实现了玉米秸秆酶解效率的提高,且相对球磨处理,降低了机械预处理过程的能耗。

2.2 不同商品酶对阿魏酰聚糖得率的影响

由图 2 可知,Validase TRL 酶解秸秆得到的阿魏酰聚糖

含量最高,为 1.46 μmol/g,是空白组(0.42 μmol/g)的 3.48 倍;其次为阿拉伯呋喃糖苷酶(1.05 μmol/g)和木糖苷酶(1.01 μmol/g),阿魏酰聚糖得率分别为空白组的 2.50 倍与 2.40 倍。

结合酶组成可知,当以木聚糖酶酶活添加量作为添加指标时,相同添加量下,纤维素酶酶活从高到低依次是 Validase TRL、阿拉伯呋喃糖苷酶、Rapidase Smart Clear 和木糖苷酶,而 HSP 6000 BG 中则未检出纤维素酶酶活。秸秆经过多级旋风磨预处理后,木质素部分被破坏,暴露出缠绕在一起的纤维素和半纤维素。当木聚糖酶和纤维素酶协同作用时,酶解效果较好,因此 Validase TRL、阿拉伯呋喃糖苷酶和木糖苷酶酶解秸秆后得到的阿魏酰聚糖含量较高;当只有木聚糖酶作用时,纤维素和半纤维素的互相缠绕则大大影响了酶解效果,同时,半纤维素的支链较多,侧链取代物也会影响木聚糖酶活性<sup>[14]</sup>,因此 HSP 6000 BG 酶解得到的阿魏酰聚糖含量较低;而 Rapidase Smart Clear 中虽然纤维素酶酶活高于木糖苷酶,但由于其阿魏酰酯酶酶活最高,将以酯键与糖链上的糖羟基结合在一起的 FA 地水解成游离态<sup>[17]</sup>(该酶酶解液中游离 FA 含量为其他酶酶解液游离 FA 含量均值的 1.96 倍),使得阿魏酰聚糖得率最低。因此,在下一步的协同酶解试验中,选择 Validase TRL 作为基酶,阿拉伯呋喃糖苷酶和木糖苷酶作为辅助酶共同对玉米秸秆进行酶解。

2.3 Validase TRL 酶解条件对阿魏酰聚糖得率的影响

2.3.1 底物浓度对阿魏酰聚糖得率的影响 由图 3 可知,当底物浓度为 10 g/L 时,阿魏酰聚糖得率最高(1.43 μmol/g),底物浓度继续增加时,反应体系的粘稠度增加,不利于酶与底物的充分接触,得率反而有所降低,根据玉米秸秆制备阿魏酰聚糖的成本限制因素为机械预处理的原料,因此选择得率最高的 10 g/L 作为最佳底物浓度。

2.3.2 酶解时间对阿魏酰聚糖得率的影响 由图 4 可知,酶解时间在 15 h 之前,酶解液中阿魏酰聚糖含量随酶解时间的增加而增加,15 h 时含量达到最高值 1.92 μmol/g,15 h 之后由于底物浓度降低,进一步的酶解产生大量游离 FA,而总 FA 含量变化不大,使得阿魏酰聚糖含量降低。因此选择 15 h 作为最佳酶解时间。

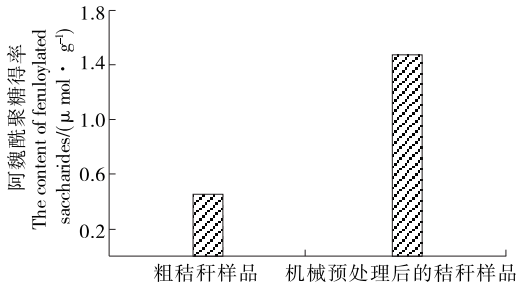


图 1 多级旋风磨预处理对酶解效率的影响

Figure 1 Effect of multi-stage cyclone grinding pretreatment on the hydrolysis efficiency of corn straw

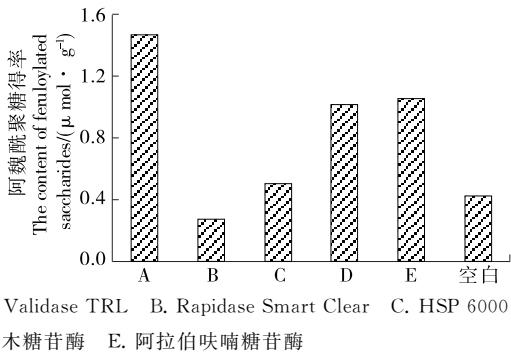


图 2 不同商品酶对阿魏酰聚糖得率的影响

Figure 2 Effect of different commercial enzymes on the yield of feruloylated saccharides

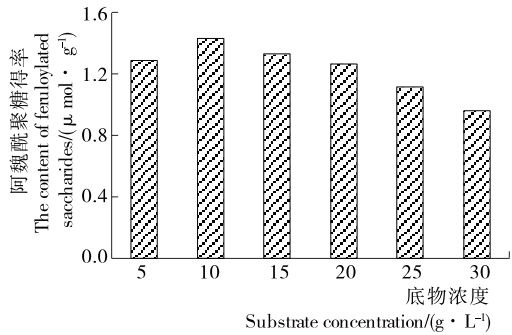


图3 底物浓度对阿魏酰聚糖得率的影响

Figure 3 Effect of different substrate concentrations on the yield of feruloylated saccharides

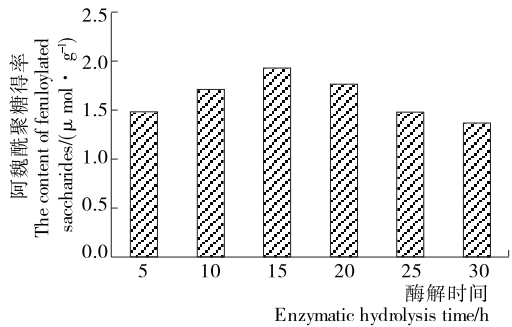


图4 酶解时间对阿魏酰聚糖得率的影响

Figure 4 Effect of different enzymatic hydrolysis time on the yield of feruloylated saccharides

2.4 协同酶解对阿魏酰聚糖得率的影响

由图5可知,当同时添加 Validase TRL 100 U/g、木糖苷酶 50 U/g 和阿拉伯呋喃糖苷酶 50 U/g 时,酶解液中阿魏酰聚糖含量最高,为 2.87 μmol/g;当 3 种酶的添加量均为 100 U/g 时,酶解液中阿魏酰聚糖含量最低(1.67 μmol/g)。这可能是 3 种商品酶里包含的阿魏酸酯酶的累积作用,产生了大量游离 FA(此时酶解液中游离 FA 含量为前者的 1.61 倍),使得酶解上清液中键合态 FA 含量减少,最终导致阿魏酰聚糖含量最低。

2.5 阿魏酰聚糖的制备

利用大孔吸附树脂 D101 对酶解条件优化后得到的酶解液进行动态吸附,并用水、10%乙醇、20%乙醇及 50%乙醇进

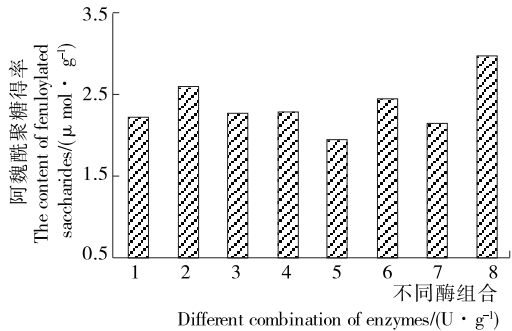


图5 协同酶解对阿魏酰聚糖得率的影响

Figure 5 Effect of different combinations of synergy enzymatic hydrolysis on the yield of feruloylated saccharides

行多级洗脱后,不同洗脱液中阿魏酰聚糖含量见表3,在上述洗脱条件下,阿魏酰聚糖的回收率为 81.44%,总得率为 2.37 μmol/g。50%的乙醇洗脱液经旋转蒸发及冷冻干燥后,固体阿魏酰聚糖样品中 FA 的含量为 3.56%,总糖含量为 69.71%,蛋白质含量为 5.13%,水分含量为 13.84%。

表3 多级洗脱对阿魏酰聚糖得率的影响

Table 3 Effect of multi-stage elution on the yield of feruloylated saccharides

| 样品    | 阿魏酰聚糖/(μmol · g <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------------------|
| 酶解液   | 2.91                            |
| 吸附残留液 | 未检出                             |
| 水洗液   | 未检出                             |
| 10%乙醇 | 0.21                            |
| 20%乙醇 | 0.14                            |
| 50%乙醇 | 2.37                            |

3 结论

多级旋风磨预处理后的秸秆经酶解后阿魏酰聚糖的得率是相同处理粗秸秆的 3.34 倍;用 5 种不同的商品酶分别酶解预处理后的秸秆,Validase TRL 酶解得到的阿魏酰聚糖得率最高,是空白组的 3.48 倍;进一步进行协同酶解,得到的最优酶组合是 Validase TRL 100 U/g、木糖苷酶 50 U/g 和阿拉伯呋喃糖苷酶 50 U/g,产物得率为 2.87 μmol/g;底物浓度和酶解时间的试验结果表明,最佳底物浓度为 10 g/L,最佳酶解时间为 15 h;最后利用大孔吸附树脂进行分离纯化,产物回收率为 81.44%,洗脱液冻干制得的阿魏酰聚糖固体中 FA 含量为 1.78%,总糖含量为 69.71%,蛋白质含量为 5.13%,水分含量为 13.84%。综上,多级旋风磨机械预处理后,对玉米秸秆进行协同酶解制备阿魏酰聚糖,可以提高玉米秸秆的附加值,为秸秆的综合利用提供了参考依据。

参考文献

[1] 徐斌. 电化学预处理玉米秸秆的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.

[2] 孙万里, 陶文沂. 木质素与半纤维素对稻草秸秆酶解的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(1): 18-22.

[3] MATHWE S, ABRAHAM T E. Ferulic acid: an antioxidant found naturally in plant cell walls and feruloyl esterases involved in its release and their application[J]. Critical Review in Biotechnology, 2004, 24(2/3): 59-83.

[4] 姚艳艳. 小麦麸皮阿魏酸提取与纯化工艺研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.

[5] 欧仕益. 阿魏酸的功能和应用[J]. 现代食品科技, 2002, 18(4): 50-53.

[6] 宋凯, 单安山. 阿魏酸的生理作用及其在饲料中的应用前景[J]. 饲料博览, 2004, 16(9): 44-46.

[7] 许仁, 薄涛大. 阿魏酸应用开发[J]. 粮食与油脂, 2000, 13(6): 7-9.

[8] 曾凤彩. 酶解玉米麸皮制备阿魏酰低聚糖及抗氧化性质的研究[D]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2012: 6.

(下转第 200 页)

阻碍,所以,过长回生时间并没有使 RS 增大反而减小。本试验表明最佳回生时间为 20 h。

2.2 正交试验结果与分析

在单因素试验的基础上,以玉米抗性淀粉得率为指标,以辐照功率、辐照时间、淀粉乳浓度和回生时间为因素,选取单因素试验中各因素最佳水平及其相邻水平(见表 1)进行正交试验,确定出最佳的工艺条件。

由表 2 可知,各因素对玉米抗性淀粉得率的影响大小为 A>D>B>C,即主要影响因素为淀粉乳浓度,其次为回升时间和辐照功率,最小影响因素为辐照时间。最佳制备工艺条件为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>2</sub>,即淀粉乳浓度 30%,辐照功率 800 W,辐照时间300 s,4 ℃ 回生 20 h。恰为表 2 中玉米抗性淀粉的得率最

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors orthogonal test level

| 试验号 | A 淀粉乳<br>浓度/% | B 辐照<br>功率/W | C 辐照<br>时间/s | D 回生<br>时间/h |
|-----|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 1   | 25            | 700          | 180          | 10           |
| 2   | 30            | 800          | 240          | 20           |
| 3   | 35            | 900          | 300          | 30           |

表 2 正交试验因素结果表

Table 2 Orthogonal test result table

| 试验号   | A    | B    | C    | D    | 抗性淀粉得率/% |
|-------|------|------|------|------|----------|
| 1     | 1    | 1    | 1    | 1    | 26.4     |
| 2     | 1    | 2    | 2    | 2    | 27.1     |
| 3     | 1    | 3    | 3    | 3    | 26.8     |
| 4     | 2    | 1    | 2    | 3    | 28.0     |
| 5     | 2    | 2    | 3    | 2    | 28.4     |
| 6     | 2    | 3    | 1    | 1    | 27.8     |
| 7     | 3    | 1    | 3    | 2    | 27.8     |
| 8     | 3    | 2    | 1    | 3    | 27.3     |
| 9     | 3    | 3    | 2    | 1    | 26.0     |
| $k_1$ | 26.7 | 27.4 | 27.1 | 26.7 |          |
| $k_2$ | 28.0 | 27.6 | 27.0 | 27.8 |          |
| $k_3$ | 27.0 | 26.8 | 27.7 | 27.3 |          |
| R     | 1.3  | 0.8  | 0.7  | 1.1  |          |

高组。说明此即为最佳制备工艺条件,不需要进行验证实验。

3 结论

本研究在前人研究的基础上,采用微波—酶法制备玉米抗性淀粉,考察了淀粉乳浓度、辐照功率、辐照时间和回生时间对玉米抗性淀粉得率的影响,结果表明:在淀粉乳浓度 30%,辐照功率 800 W,辐照时间 300 s,4 ℃ 回生 20 h,的工艺条件下,玉米抗性淀粉的得率最高,为 28.4%。但是在制备过程中,除了本研究考察的因素以外,还有一些其他的因素如反应 pH、样品烘干方式、酶的使用温度、糊化度、酶作用时间等对抗性淀粉的具体作用还需要进一步研究。

参考文献

[1] 唐书泽, 潘元风. 微波辐射制备蚕豆抗性淀粉研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(5): 15-18.

[2] 陈光, 高俊鹏, 薛健, 等. 抗性淀粉的功能特性及应用研究现状[J]. 吉林农业大学报, 2005, 27(5): 578-581.

[3] 薛山. 新型膳食纤维—抗性淀粉在食品工业中的应用及前景[J]. 中国高新技术企业, 2009(3): 86-88.

[4] 黄志强, 唐健, 白永亮, 等. 抗性淀粉及其防治肥胖症的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 250-253.

[5] 刘莎莎, 李保国, 郭雯丽, 等. 高抗性淀粉米乳饮料的稳定性研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 229-231.

[6] 刘亚伟, 张杰. 抗性淀粉制备工艺研究[J]. 食品与机械, 2003 (1): 19-20.

[7] 周世成, 刘国琴, 李琳, 等. 抗性淀粉的制备与应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2009, 17(2): 51-53.

[8] 李翠莲, 方北曙, 黄中培. 抗性淀粉的制备及应用研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(7): 843-845.

[9] 徐红华, 徐丹鸿. 玉米抗性淀粉的制备及其物理特性的研究[J]. 食品科技, 2008(3): 79-82.

[10] 刘艳, 周丽娜, 闵伟红, 等. 高直链玉米抗性淀粉制备工艺的优化研究[J]. 安徽农业科学, 2009(35): 186-189.

[11] 肖永霞. 微波—酶法制备小麦抗性淀粉工艺条件优化及性质的研究[D]. 济南: 山东轻工业学院, 2009.

[12] 朱木林, 梁雯霏, 李玉龙, 等. 微波—酶法制备甘薯抗性淀粉的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 180-183.

(上接第 192 页)

[9] 林奇龄, 温其标, 欧仕益, 等. 酸解制备低聚糖阿魏酸酯的优化工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(6): 81-85.

[10] 姚惠源, 胡敏, 袁小平, 等. 酶法制备阿魏酰低聚糖的研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(4): 3-7.

[11] RACHEL R S, ANDREAS B, CATRIN E T, et al. Isolation and characterization of feruloylated arabinoxylan oligosaccharides from the perennial cereal grain intermediate wheat grass (Thinopyrum intermedium)[J]. Carbohydrate Research, 2015, 407: 16-25.

[12] NOBUAKI S, YOHEI T, MASAHIRO M, et al. Production of feruloylated arabino-oligosaccharides(FA-AOs) from beet fiber by hydrothermal treatment[J]. The Journal of Supercritical Fluides, 2013, 79: 84-91.

[13] 王璐璐, 蔡国林, 朱德伟, 等. 球磨预处理和固态发酵对玉米秸

秆饲用品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2014(11): 1 148-1 153.

[14] 刘元元, 徐泽平. 阿魏酸酯酶酶活性的分光光度法测定及影响因素的研究[J]. 食品工业科技, 2013(13): 284-288.

[15] FERREIRA P, DIEZ N, FAULDS C B, et al. Release of ferulic acid and feruloylated oligosaccharides from sugar beet pulp by *Streptomyces tendae* [J]. Bioresource Technology, 2007, 98 (8): 1 522-1 528.

[16] 张麟, 蔡国林, 高献礼, 等. 粉碎及酶处理对啤酒糟理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 13-18.

[17] NIETER A, HAASE A P, LINKE D, et al. A halotolerant type A feruloyl esterase from *Pleurotus eryngii*[J]. Fungal Biology, 2014, 118(3): 348-357.