

文章编号:1673-1689(2008)03-0120-05

## 魔芋葡甘露聚糖的酶水解工艺条件

徐春梅<sup>1</sup>, 邬敏辰<sup>\*2</sup>, 李剑芳<sup>1</sup>, 邓超<sup>2</sup>

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 医药学院, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:**研究了利用黑曲霉(*Aspergillus niger*)E-56菌株所产高活力 $\beta$ -甘露聚糖酶水解魔芋葡甘露聚糖的工艺条件。在单因素试验的基础上,进一步通过正交试验确定酶法制备甘露低聚糖的最佳工艺条件为:魔芋胶质量浓度240 g/L(去离子水配制),加酶量为120 U/g,50℃酶解8 h。在该工艺条件下,酶解液中葡甘露低聚糖的平均聚合度(DP)在1.8~1.9范围内。

**关键词:** $\beta$ -甘露聚糖酶;魔芋胶;葡甘露低聚糖;正交试验

中图分类号:Q 53; Q 556.2

文献标识码: A

## Study on Hydrolytic Conditions of Konjak Glucomannan by $\beta$ -Mannanase

XU Chun-mei<sup>1</sup>, WU Min-chen<sup>\*2</sup>, LI Jian-fang<sup>1</sup>, DENG-chao<sup>2</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Medicine, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The hydrolytic conditions of konjak gum for producing glucomannan oligosaccharides were studied with high activity  $\beta$ -mannanase from *Aspergillus niger* E-56. Based on single factor test, the optimum conditions were obtained by orthogonal test. The optimum hydrolytic conditions were as follows: konjak gum solution 240 g/L (with deionized water), hydrolytic temperature 50℃,  $\beta$ -mannanase dosage 120 U/g konjak gum, and hydrolytic time 8 h. With these conditions, the range of average polymerization degree (DP) was 1.8~1.9 in hydrolysates.

**Key words:**  $\beta$ -mannanase; konjak gum; glucomannan oligosaccharides; orthogonal test

魔芋葡甘露聚糖(Konjak glucomannan, KGM)是一种由D-葡萄糖和D-甘露糖按1:1.6或1:1.7的摩尔比,以 $\beta$ -1,4糖苷键连接成主链并含有 $\beta$ -1,3糖苷键支链的高分子不均一多糖<sup>[1]</sup>。采用 $\beta$ -甘露聚糖酶水解KGM,可生成2~10个单糖的魔芋葡甘露低聚糖(konjak glucomannan oligosaccharides, KGMOS)<sup>[2]</sup>。KGMOS除了具有低热量、稳定、安全等理化特性外,还能促进肠道内双歧杆菌等有益菌群增殖,提高机体抗氧化能力,对

实验性高血脂血症的防治、降血脂和护肝作用,排除体内毒素和增强机体免疫力等多种生理功能<sup>[3-6]</sup>。酶法制备KGMOS的核心技术是采用高活力 $\beta$ -甘露聚糖酶和高浓度魔芋胶溶液。但目前发酵酶活力低,导致酶的生产和使用成本高<sup>[7]</sup>;同时由于魔芋胶水溶液的粘度非常大,40 g/L的魔芋胶已呈凝胶状态,可阻止酶对它的水解作用<sup>[8]</sup>。因此所有国内外文献报道的魔芋胶酶水解工艺均采用10~30 g/L的魔芋胶溶液,导致了酶解产物的后处理成本

收稿日期:2007-04-09.

作者简介:徐春梅(1983-),女,江苏高邮人,营养与食品卫生硕士研究生。

\* 通讯作者:邬敏辰(1962-),男,江苏无锡人,理学博士,副教授,主要从事分子生物学的研究,Email:bioch@163.com

很高、生产效率极低,仍处于实验室或中试阶段<sup>[9]</sup>。

针对存在的问题,作者采用 E-56 菌株所产高活力  $\beta$ -甘露聚糖酶(另文报道),设计了一种独特的魔芋胶酶水解工艺(在不断搅拌下,15~20 min 内将定量的魔芋胶以少量、连续的方式加入含  $\beta$ -甘露聚糖酶的去离子水中),将魔芋胶质量浓度由 10~30 g/L 提高至 240 g/L,可实现产业化酶法生产魔芋葡甘露低聚糖。查新结果表明,未发现与本魔芋胶酶水解工艺相同的国内外文献报道。

## 1 材料与方法

### 1.1 菌株与酶液

黑曲霉  $\beta$ -甘露聚糖酶高产菌株 *Aspergillus niger* E-56,由江南大学医药学院分子生物学研究室选育。在优化的固态发酵工艺条件下,于 32 ℃ 培养 84 h, $\beta$ -甘露聚糖酶发酵酶活力高达每克干曲 42 000 U。该成熟麸曲直接用去离子水浸提,可获  $\beta$ -甘露聚糖酶粗酶液,酶活力达 12 000 U/mL 以上。该酶的最适反应温度和 pH 分别为 70 ℃ 和 3.5,温度低于 70 ℃、pH 为 2.5~8.0 范围稳定, $Al^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  对酶有激活作用, $Ag^+$  对酶有一定的抑制作用。

### 1.2 原料与试剂

麸皮、豆饼粉和玉米浆:无锡市恒盛生物技术有限公司提供;甘露糖、角豆胶:购自 Sigma 公司;魔芋胶(普通魔芋精粉 PK04,粒度  $\geq 40$  目,KGM 质量分数  $\geq 70\%$ 、蛋白质质量分数  $\leq 4.6\%$ 、脂肪质量分数  $\leq 0.1\%$ 、淀粉质量分数  $\leq 0.5\%$ 、水分质量分数  $\leq 12\%$ 、 $SO_2$  质量分数  $\leq 0.3\%$ 、灰分质量分数  $\leq 3.0\%$ );购自成都百仕隆生物科技有限公司;其它试剂均为国产分析纯。

### 1.3 实验方法

**1.3.1  $\beta$ -甘露聚糖酶活力测定** 按文献<sup>[10]</sup>并略作修改:在 2.4 mL 5.0 g/L 角豆胶底物溶液(用 pH 4.8 乙酸-乙酸钠缓冲液配制)中加入 0.1 mL 适当稀释的酶液,(50  $\pm$  0.2) ℃ 恒温水浴保温 15 min;采用 DNS 法测定酶解产生的还原糖量。在上述条件下,以每分钟酶解角豆胶底物释放 1  $\mu$ mol 还原糖(以甘露糖计)所需的酶量定义为 1 个  $\beta$ -甘露聚糖酶活力单位(U)。

### 1.3.2 魔芋胶总糖和游离还原糖含量测定

**1) 魔芋胶总糖含量测定** 该总糖是指 KGM (不含淀粉)提取液被酸完全水解后所有还原性单糖之总。称取 0.100 g 魔芋胶,加入 0.01 mol/L 的甲酸-氢氧化钠缓冲液(pH 3.2)40 mL,于室温溶胀 4 h 并定容至 50 mL,4 000 r/min 离心 20 min,上清

液即为 KGM 提取液。吸取 4 mL 提取液于 25 mL 的具塞试管中,加入 0.5 mL 6 mol/L 的  $H_2SO_4$ ,混匀,于沸水浴中密闭水解 1.5 h,NaOH 中和并定容至 10 mL。取滤液 0.5 mL 用 DNS 法测定还原糖量,总糖按公式(1)计算:

$$\text{魔芋胶总糖质量分数} = \frac{\text{还原糖总量(g)}}{\text{魔芋胶量(g)}} \times 100\% \quad (1)$$

**2) 魔芋胶游离还原糖含量测定** 游离还原糖是指样品水解前的还原糖。称取 0.250 g 魔芋胶,置 250 mL 的具塞三角瓶中,加去离子水 70 mL 室温溶胀 2 h 并定容至 100 mL,4 000 r/min 离心 20 min,取上清液 2.5 mL 用 DNS 法测定还原糖量,游离还原糖含量按公式(2)计算:

$$\text{魔芋胶游离还原糖质量分数} = \frac{\text{游离还原糖量(g)}}{\text{魔芋胶量(g)}} \times 100\% \quad (2)$$

**3) 魔芋胶葡甘露聚糖含量计算** KGM 是指样品中魔芋胶总糖含量与游离还原糖含量之差乘以 0.9(换算系数),按公式(3)计算:

$$\text{魔芋胶葡甘露聚糖质量分数} = \frac{\text{还原糖总量(g)} - \text{游离还原糖量(g)}}{\text{魔芋胶量(g)}} \times 0.9 \times 100\% \quad (3)$$

**1.3.3 魔芋胶水解率测定**  $\beta$ -甘露聚糖酶水解魔芋胶一定时间,取样、灭酶、离心,取上清液适当稀释后用 DNS 法测定还原糖(以甘露糖计)量。魔芋胶水解率按公式(4)计算:

$$\text{魔芋胶水解率} = \frac{\text{酶解液还原糖量(g)} - \text{游离还原糖量(g)}}{\text{魔芋胶总糖量(g)}} \times 100\% \quad (4)$$

**1.3.4 酶解液平均聚合度测定** 平均聚合度(DP)是指魔芋胶总糖量与酶解液还原糖量之比值。数值越接近 1,表示酶解越彻底。当制备魔芋葡甘露低聚糖时,该比值一般控制在 1.8~1.9 之间<sup>[7]</sup>。

$$\text{平均聚合度(DP)} = \frac{\text{魔芋胶总糖量(g)}}{\text{酶解液还原糖量(g)}} \quad (5)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 魔芋胶总糖和游离还原糖含量

同一批魔芋胶样品重复多次测定,结果见表 1。经统计学方法<sup>[11]</sup>检验,总糖含量的标准差  $\delta = \pm 0.46$ ,变动系数  $CV = \pm 0.57$ ;游离还原糖含量的标准差  $\delta = \pm 0.0939$ ,变动系数  $CV = \pm 2.2$ ,实验数据可靠。由此可确定该魔芋胶样品的总糖质量

分数为 80.19%，游离还原糖质量分数为 4.30%，KGM 质量分数为 68.30%。

表 1 魔芋胶总糖和游离还原糖含量测定结果

Tab.1 Determination of the total sugar and free reducing sugar

| 测定次数 | 总糖<br>质量分数/% | 游离还原糖<br>质量分数/% | KGM<br>质量分数/% |
|------|--------------|-----------------|---------------|
| 1    | 80.30        | 4.14            | 68.54         |
| 2    | 80.76        | 4.25            | 68.86         |
| 3    | 79.54        | 4.41            | 67.62         |
| 4    | 80.61        | 4.35            | 68.63         |
| 5    | 80.61        | 4.41            | 68.58         |
| 6    | 79.70        | 4.22            | 67.93         |
| 7    | 79.85        | 4.31            | 67.99         |
| 8    | 80.15        | 4.28            | 68.28         |
| 平均值  | 80.19        | 4.30            | 68.30         |

2.2 魔芋胶酶解条件单因素试验

2.2.1 酶解 pH 值的选择 在每克魔芋胶加酶量 80 U、50 ℃水解 6 h 条件下，试验了用去离子水及不同 pH 值缓冲液配制的魔芋胶溶液(80 g/L)对水解率的影响(见表 2)。表 2 结果表明，用 pH 5.5~6.5 缓冲液配制的魔芋胶溶液的水解率较低(<47%)；用去离子水(pH 6.0 左右)或 pH 3.0~5.0 缓冲液配制的水解率较高(>50%)，以 pH 3.5 最高。与所用 β-甘露聚糖酶的最适作用 pH 3.5 相吻合<sup>[12]</sup>，也表明离子强度对该酶有一定影响。考虑到缓冲液离子将给酶解液精制带来困难和增加生产成本，因此在实际应用中以去离子水配制魔芋胶溶液<sup>[8, 13]</sup>。以下试验均采用去离子水配制魔芋胶溶液。

表 2 魔芋胶溶液 pH 值对水解率的影响

Tab.2 Effect of the pH of konjak gum solution on hydrolytic rate

| pH 值 | 还原糖量/(g/L)   | 水解率/%        |
|------|--------------|--------------|
| 3.0  | 38.43 ± 0.27 | 54.55 ± 0.41 |
| 3.5  | 40.01 ± 0.42 | 57.01 ± 0.66 |
| 4.0  | 38.58 ± 0.54 | 54.77 ± 0.85 |
| 4.5  | 37.88 ± 0.85 | 53.69 ± 0.54 |
| 5.0  | 36.39 ± 0.65 | 51.36 ± 0.80 |
| 去离子水 | 35.81 ± 0.32 | 50.46 ± 0.50 |
| 5.5  | 33.58 ± 0.58 | 46.98 ± 0.91 |
| 6.0  | 31.35 ± 0.49 | 43.51 ± 0.77 |
| 6.5  | 27.03 ± 0.59 | 36.77 ± 0.91 |

2.2.2 魔芋胶酶解加酶量的确定 在魔芋胶质量浓度 80 g/L、50 ℃水解 6 h 条件下，试验了加酶量

对魔芋胶酶解液平均聚合度(DP)的影响(表 3)。随着加酶量的增加，酶解液中的还原糖量逐渐增加，平均聚合度逐渐降低。由于本试验的目的是获取高含量的魔芋葡甘露低聚糖，尽量减少单糖的量，因此参考李剑芳等人<sup>[8]</sup>的文献报道，将 DP 控制在 1.8~1.9 范围内，即加酶量确定为每克魔芋胶 70~80 U。

表 3 加酶量对魔芋胶酶解液还原糖量及 DP 的影响

Tab.3 Effect of the dosage of enzyme on reducing sugar and DP of hydrolysates

| 加酶量/<br>(U/g) | 还原糖<br>质量浓度/(g/L) | 平均<br>聚合度 DP |
|---------------|-------------------|--------------|
| 60            | 31.45             | 2.04         |
| 70            | 33.76             | 1.90         |
| 80            | 35.42             | 1.81         |
| 90            | 36.04             | 1.78         |
| 100           | 37.52             | 1.71         |
| 110           | 38.12             | 1.68         |

2.2.3 魔芋胶酶解时间的影响 在魔芋胶质量浓度 80 g/L、50 ℃、加酶量分别取 40、60、80 U/g 的条件下，试验了不同酶水解时间对酶解液 DP 的影响(见图 1)。由图 1 可见，酶解液 DP 随酶解时间增加而逐渐降低，且发现加酶量和酶解时间对 DP 的影响是关联的，即达到一定的 DP，加酶量越大，酶解时间越短；加酶量越少，酶解时间越长。为了控制 DP 在 1.8~1.9 范围内，在加酶量分别取 40、60、80 U/g 的情况下，对应的酶解时间控制在 10~12 h、7~9 h 和 5~6 h。

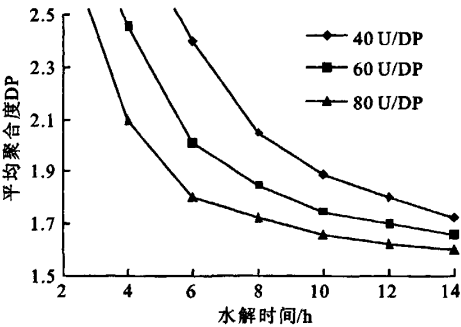


图 1 酶解时间对魔芋胶酶解液平均聚合度的影响

Fig.1 Effect of hydrolytic time on the DP of konjak hydrolysates

2.2.4 魔芋胶酶解温度的影响 试验了不同酶解温度对 DP 的影响(见表 4)。结果表明，在 40~60 ℃范围内，温度和加酶量对 DP 影响是关联的，即温度越高，加酶量越少。为控制 DP 在 1.8~1.9 内，不同酶解温度下每克魔芋胶加酶量可分别取

40 ℃、90 U,50 ℃、70~80 U,60 ℃、60 U。

表 4 酶解温度对魔芋胶酶解液还原糖量及 DP 的影响  
Tab.4 Effect of temperature on the reducing sugar and DP of konjak hydrolysates

| 温度/<br>℃ | 加酶量/<br>(U/g) | 还原糖量/<br>(g/L) | 平均聚合度 DP |
|----------|---------------|----------------|----------|
| 40       | 80            | 33.24          | 1.93     |
|          | 90            | 35.64          | 1.80     |
|          | 100           | 35.84          | 1.79     |
| 50       | 70            | 35.05          | 1.83     |
|          | 80            | 35.64          | 1.80     |
|          | 90            | 36.45          | 1.76     |
| 60       | 60            | 35.44          | 1.81     |
|          | 70            | 36.87          | 1.74     |
|          | 80            | 38.88          | 1.65     |

2.2.5 魔芋胶质量浓度的影响 首先在 50 ℃水解 6 h 条件下,试验了魔芋胶质量浓度对 DP 的影响(见图 2)。由图 2 可见,魔芋胶质量浓度越高,DP 也越高,当魔芋胶质量浓度超过 200 g/L 时,DP 均大于 1.9。为达研究目的,作者采取了延长酶解时间的措施。在每克魔芋胶加酶量 100 U、酶解温度 50 ℃下,分别于 4、6、8、10 h 测定(见图 3)。由图 3 可见,为使 DP 值在 1.8~1.9 范围内,反应时间需 8 h。

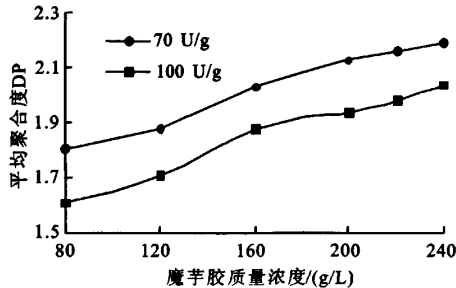


图 2 魔芋胶质量浓度对酶解液平均聚合度的影响  
Fig.2 Effect of konjak solution concentration on the DP of hydrolysates

2.3 魔芋胶酶解条件正交试验

2.3.1 正交试验结果 选择加酶量、魔芋胶浓度、酶解时间 3 个因素,利用正交试验表  $L_9(3^4)$  进行三因素三水平正交试验(见表 5)。表 5 结果表明,加酶量的极差  $R = 0.17$  为最大,魔芋胶质量浓度的极差  $R = 0.06$  为最小。为控制 DP 在 1.8~1.9 内,同时考虑工艺的简化和成本的最小化,故最佳魔芋胶酶水解工艺条件为:加酶量为 120 U/g,魔芋胶质量浓度 240 g/L 及 50 ℃水解 8 h。

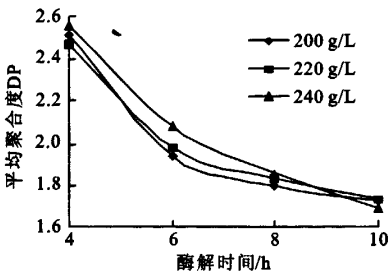


图 3 酶解时间对魔芋胶酶解液平均聚合度的影响  
Fig.3 Effect of hydrolytic time on the DP of konjak hydrolysates

表 5 正交试验数据及处理结果  
Tab.5 Data and Results of  $L_9(3^4)$  orthogonal test

| 试验    | 加酶量/<br>(U/g) | 魔芋胶质量<br>浓度/(g/L) | 酶解<br>时间/h | 平均聚<br>合度 DP |
|-------|---------------|-------------------|------------|--------------|
| 1     | 1(80)         | 1(220)            | 3(10)      | 1.88         |
| 2     | 2(100)        | 1                 | 1(6)       | 1.97         |
| 3     | 3(120)        | 1                 | 2(8)       | 1.77         |
| 4     | 1             | 2(240)            | 2          | 1.92         |
| 5     | 2             | 2                 | 3          | 1.90         |
| 6     | 3             | 2                 | 1          | 1.85         |
| 7     | 1             | 3(260)            | 1          | 2.11         |
| 8     | 2             | 3                 | 2          | 1.90         |
| 9     | 3             | 3                 | 3          | 1.77         |
| $K_1$ | 5.91          | 5.62              | 5.93       |              |
| $K_2$ | 5.77          | 5.67              | 5.59       |              |
| $K_3$ | 5.39          | 5.78              | 5.55       |              |
| $k_1$ | 1.97          | 1.87              | 1.98       |              |
| $k_2$ | 1.92          | 1.89              | 1.86       |              |
| $k_3$ | 1.80          | 1.93              | 1.85       |              |
| R     | 0.17          | 0.06              | 0.13       |              |

2.3.2 最佳酶水解条件验证 选用上述最佳魔芋胶酶水解工艺条件,重复试验 3 次(见表 6)。由表 6 可见,3 次试验结果 DP 值均在 1.8~1.9 之间,符合研究目标。

表 6 最佳酶水解条件的验证  
Tab.6 Verification of the optimum hydrolytic conditions

| 实验<br>次数 | 因素            |                   |            | DP   |
|----------|---------------|-------------------|------------|------|
|          | 加酶量/<br>(U/g) | 魔芋胶质量<br>浓度/(g/L) | 酶解<br>时间/h |      |
| 1        | 120           | 240               | 8          | 1.85 |
| 2        | 120           | 240               | 8          | 1.87 |
| 3        | 120           | 240               | 8          | 1.86 |

### 3 结 语

利用黑曲霉(*Aspergillus niger*) E-56 菌株所产高活力 $\beta$ -甘露聚糖酶,研究了魔芋葡甘露聚糖的酶水解工艺条件。在单因素试验的基础上,进一步

通过正交试验确定了酶水解魔芋胶制备葡甘露低聚糖的最佳工艺条件为:魔芋胶质量浓度 240 g/L (用去离子水配制),酶解温度 50 ℃、加酶量每克魔芋胶 120 U,酶解时间 8 h。彻底解决了现有魔芋葡甘露低聚糖生产工艺中由于酶活力低、魔芋胶浓度低所导致的生产效率低、成本高的缺陷。

### 参考文献(References):

- [1] Williams P A, Foster T J, Martin D R, et al. A molecular description of the gelation mechanism of konjac mannan[J]. *Biomacromolecules*, 2000, 1(3): 440-450.
- [2] 许牡丹, 柯 蕾, 曾桥, 等. 黑曲霉 $\beta$ -甘露聚糖酶水解魔芋粉制备甘露低聚糖的研究[J]. *西北农业学报*, 2005, 14(6): 115-118.
- XU Mu-dan, KE Lei, ZENG Qiao, et al. Investigated production of mannan-oligosaccharides using konjak powder by  $\beta$ -mannan mannohydrolase from *Aspergillus niger*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(6): 115-118. (in Chinese)
- [3] 吴拥军, 王嘉福, 蔡金藤, 等. 魔芋葡甘露低聚糖的提取及其产物对耐氧双歧杆菌的促生长作用[J]. *食品科学*, 2002, 23(6): 41-44.
- WU Yong-jun, WANG Jia-fu, CAI Jin-teng, et al. The growth promoting effects on bifidobacterium from extracts and products of konjac glucomannan oligosaccharides[J]. *Food Science*, 2002, 23(6): 41-44. (in Chinese)
- [4] 杨艳燕, 李小明, 李顺意, 等. 魔芋低聚糖对小鼠血糖含量和抗氧化能力的影响[J]. *中草药*, 2001, 32(2): 142-144.
- YANG Yan-yan, LI Xiao-ming, LI Shun-yi, et al. Effect of konjac oligosaccharide on blood sugar and antioxidant ability of mice[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2001, 32(2): 142-144. (in Chinese)
- [5] 陈黎, 杨艳燕, 闫达中. 魔芋低聚糖降脂作用的初步研究[J]. *中国生化药物杂志*, 2002, 23(4): 181-182.
- CHEN Li, YANG Yan-yan, YAN Da-zhong. The effects of konjac oligosaccharides on decreasing blood lipid[J]. *Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics*, 2002, 23(4): 181-182. (in Chinese)
- [6] 李小宁. 魔芋甘露低聚糖口服液对雌性 ICR 小鼠免疫功能的调节作用[J]. *江苏预防医学*, 1998 (4): 3-4.
- LI Xiao-ning. Regulating effects of syrupus KGMOS on the female ICR mice immunologic function[J]. *Jiangsu Preventive Medicine*, 1998(4): 3-4. (in Chinese)
- [7] 李剑芳, 邹敏辰, 程科, 等.  $\beta$ -甘露聚糖酶制备魔芋葡甘露低聚糖的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2007, 33(1): 21-24.
- LI Jian-fang, WU Min-chen, CHENG Ke, et al. Study on the preparation of oligo-glucomannan using konjak gum by  $\beta$ -mannanase[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2007, 33(1): 21-24. (in Chinese)
- [8] 杨文博, 佟树敏, 时薇, 等.  $\beta$ -甘露聚糖酶水解植物胶条件的研究[J]. *食品与发酵工业*, 1996, 22 (1): 14-17.
- YANG Wen-bo, TONG Shu-min, SHI Wei, et al. A study on enzymic hydrolysis conditions of plant gums by  $\beta$ -mannanase[J]. *Food and Fermentation Industries*, 1996, 22 (1): 14-17. (in Chinese)
- [9] 陶兴无. 酸酶结合法水解魔芋葡甘露聚糖工艺研究[J]. *武汉工业学院学报*, 2005, 24(3): 1-4.
- TAO Xing-wu. Study on the hydrolysis condition of konjac glucomana by combining with acid and enzyme[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2005, 24(3): 1-4. (in Chinese)
- [10] Akino T, Nakamura N, Horikoshi K. Characterization of three  $\beta$ -mannanase of an alkaliphilic *Bacillus* sp. [J]. *Agric Biol Chem*, 1988, 52(3): 773-779.
- [11] 吴有炜. 试验设计与数据处理[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2002.
- [12] 朱劭, 邹敏辰. 黑曲霉酸性 $\beta$ -甘露聚糖酶的酶学特性[J]. *食品与生物技术学报*, 2007, 26(2): 21-25.
- ZHU Jie, WU Min-chen. Studies on the characterization of the acidic  $\beta$ -mannanase from *Aspergillus niger*[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2007, 26(2): 21-25. (in Chinese)
- [13] 余红英, 杨幼慧, 孙远明, 等.  $\beta$ -甘露聚糖酶作用魔芋胶条件研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(7): 33-35.
- YU Hong-ying, YANG You-hui, SUN Yuan-ming, et al. A study on the hydrolysis condition of konjac gum with  $\beta$ -mannanase[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 24(7): 33-35. (in Chinese)

(责任编辑:杨 萌)