

双酶协同制备玉米慢消化淀粉及其性质研究

高群玉, 王琳

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 以普通玉米淀粉为原料, 利用 β -淀粉酶和葡萄糖苷转移酶协同处理制备慢消化淀粉, 并研究其理化性质。试验表明, 原淀粉在 β -淀粉酶加酶量为 20 mL、反应时间为 4 h, 葡萄糖苷转移酶加酶量为 20 mL、反应时间为 12 h 时, 慢消化淀粉含量最高可达 16.37%; 所有经过双酶处理后的样品的淀粉-碘吸附结合物的最大吸收峰位置, 随着慢消化淀粉含量的增加而偏移增大; 差示扫描量热仪结果表明慢消化淀粉样品的糊化起始温度、峰值温度、终止温度、起始与终止温度差均有显著的升高, 淀粉热稳定性增强, 糊化变得困难; 与玉米原淀粉 A 型结晶结构相比, 所有样品的晶型消失, 仅在 $2\theta=19.8^\circ$ 附近出现尖锐的衍射峰, $2\theta=13.1^\circ$ 附近有一弥散峰; 扫描电镜结果显示, 酶解后的样品变成不规则碎片, 不再具有原淀粉的颗粒结构。

关键词: 玉米淀粉; 慢消化淀粉; 大麦 β -淀粉酶; 葡萄糖苷转移酶

文章编号: 1673-9078(2013)10-2425-2430

Preparation and Properties of Corn Slowly Digestible Starch with Dual-enzymes Treatment

GAO Qun-yu, WANG Lin

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The common corn starch was applied as raw material to prepare the slowly digestible starch (SDS) by using β -amylase and transglucosidase, and the physicochemical properties of the SDS were also investigated. The content of SDS was up to 16.37% with addition of 20 mL β -amylase and 20 mL transglucosidase by stirring for 4 h and 12 h, respectively. The position of maximum absorption peak of starch samples binding iodine shifted obviously with increasing SDS content. Analysis by differential scanning calorimeter showed that the onset melting temperatures, the peak temperatures, terminated temperatures and the temperature differences between beginning and ending of SDS were improved significantly and its thermal stabilities were enhanced, resulting in more difficulty for starches to gelatinize. Compared to the native corn starch displayed "A" typical diffraction pattern, no crystal structure was found for all samples modified by enzymes which represented sharp diffraction peaks at $2\theta=19.8^\circ$ and diffuse diffraction peaks at $2\theta=13.1^\circ$. Scanning electron micrographs revealed that all enzyme-treated samples had more irregular fragments without granular structures as native starch.

Key words: corn starch; slowly digestible starch; β -amylase; transglucosidase

淀粉是植物中碳水化合物贮藏的主要形式, 也是为人体提供能量的主要来源。由于淀粉消化的方式和速度会影响人体餐后的血糖应答, 故英国学者 Englyst 等^[1]根据葡萄糖的释放率和其在胃肠道的吸收, 将淀粉分为易消化淀粉 (ready digestible starch, RDS)、缓慢消化淀粉 (slowly digestible starch, SDS) 和抗性淀粉 (resistant starch, RS) 三类。其中, 易消化淀粉指的是在摄入后引起血糖快速增加的淀粉 (0~20 min); 缓慢消化淀粉指的是在小肠中被完全消化, 但速率较慢的淀粉 (20~120 min); 抗性淀粉

指的是在小肠中不被消化, 却可在大肠中被微生物发酵利用的淀粉 (>120 min)^[2]。缓慢消化淀粉具有多种生理功能, 可以调节机体血糖水平, 降低餐后胰岛素分泌; 有利于控制肥胖、保持适宜体重, 可作为肥胖人群的减肥产品; 还可改善肠道运动, 减少肠机能失调及结肠癌等发病率^[3]。

缓慢消化淀粉的制备主要依赖于淀粉酶的作用。 β -淀粉酶作为外切酶, 不能水解 α -1,6 葡萄糖苷键也不能越过分支点继续水解, 但可以从淀粉的非还原端依次切开 α -1,4 糖苷键, 得到麦芽糖单位^[4], 促使淀粉链长缩短。而葡萄糖苷转移酶可以催化低聚麦芽糖的水解和它的转移反应, 形成新的 α -1,6 葡萄糖苷键, 同时生成具有多分支结构的糖苷键^[5]。于国萍等^[6]在 2011 年分别利用 α -淀粉酶和 β -淀粉酶处理普通玉米淀粉制

收稿日期: 2013-06-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (31230057), 广东省部产学研 (2012B091100291)

作者简介: 高群玉 (1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师

备缓慢消化淀粉,发现两种制备方法的最佳工艺条件差别不大,但 β -淀粉酶法制备的SDS产品得率要优于 α -淀粉酶,并指出 β -淀粉酶更适宜提高SDS产率。Zihua Ao等^[1]在2007年通过采用麦芽糖 α -淀粉酶、 β -淀粉酶以及这两种酶分别添加葡萄糖苷转移酶四种方法水解玉米淀粉,增加淀粉的分支结构,降低淀粉的消化率,研究表明 β -淀粉酶与葡萄糖苷转移酶协同可制备较高含量的SDS产品。目前,国外学者对SDS的研究非常活跃,在国际上已成为新的研究热点。但国内学者对酶法制备SDS多为单一改性,对双酶制备SDS及其详细的理化性质分析并没有深入阐述。

本实验采用 β -淀粉酶与葡萄糖苷转移酶双酶协同制备玉米缓慢消化淀粉,探究 β -淀粉酶、葡萄糖苷转移酶不同加酶量对缓慢消化淀粉形成过程的影响,并重点阐述了不同SDS含量样品的淀粉-碘吸附结合物的吸收曲线、X射线衍射图、热力学性质和颗粒形貌,以期更好的阐明双酶处理对SDS结构和缓慢消化性质的影响,为制备高含量的SDS提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和设备

普通玉米淀粉,中粮生化能源(公主岭)有限公司;大麦 β -淀粉酶(65 u/mL)、葡萄糖苷转移酶L-AMANO(3 ku/mL),阿玛诺天野酶制剂商贸(上海)有限公司;猪胰酶(P7545)、淀粉葡萄糖苷酶(A7095),美国Sigma公司;GOPOD葡萄糖试剂盒,爱尔兰Megazyme公司;实验中所使用的其他试剂或药品均为分析纯。

EVO 18 扫描电子显微镜,德国Zeiss公司;DSC-8000 差示扫描量热仪,美国Perkin Elmer公司;D8 Advance X 射线衍射仪,德国Bruker公司;i5 紫外可见分光光度计,济南海能仪器有限公司;XW-80A 漩涡混合器,上海精科实业有限公司产品;HH-2 数显恒温水浴锅,江苏金坛市富华仪器有限公司;恒温振荡器,常州澳华仪器有限公司。

1.2 慢消化淀粉样品制备

1.2.1 β -淀粉酶添加量对慢消化淀粉含量的影响

称取8 g(干基)玉米淀粉,用pH5.2的0.5 mol/L 乙酸-乙酸钠缓冲溶液配成8%的淀粉乳,于95 °C水浴下充分搅拌30 min,糊化完全后冷却至55 °C,分别加入10、15、20、25、30 mL β -淀粉酶,并添加缓冲液使溶液总体积均为130 mL,反应4 h后沸水浴灭酶

10 min。冷却至室温,在已灭酶的反应液中加入20 mL 葡萄糖苷转移酶继续反应,置于55 °C恒温水浴中搅拌12 h。反应结束后,加入等体积的无水乙醇,于4000 r/min 离心15 min,重复2次。将所得沉淀在45 °C烘箱中烘24 h,粉碎,过100目筛,即得不同 β -淀粉酶添加量所制得的SDS样品B10、B15、B20、B25、B30。

1.2.2 葡萄糖苷转移酶添加量对慢消化淀粉含量的影响

将8%的玉米淀粉乳糊化并冷却至55 °C,添加20 mL β -淀粉酶与10 mL 缓冲液反应4 h,沸水浴10 min 灭酶,冷却至室温,分别添加10、15、20、25、30 mL 葡萄糖苷转移酶,并加入一定量的缓冲液使溶液总体积保持一致,置于55 °C恒温水浴中搅拌12 h。其他处理条件同1.2.1,得到不同葡萄糖苷转移酶添加量所制得的SDS样品,分别记为T10、T15、T20、T25、T30。

1.3 慢消化淀粉含量测定方法^[1,8]

制备混酶:称取1.5 g 猪胰酶于50 mL 离心管中,加入5 mL 0.1 mol/L 的乙酸钠缓冲液和磁力搅拌棒,在漩涡混合器上涡旋混匀后,置于磁力搅拌器搅拌10 min,然后以4000 r/min 离心10 min。在上清液中加入0.5 mL 淀粉葡萄糖苷酶,即为混酶。

称取0.3 g(干基)淀粉样品于COD管中,添加7.5 mL pH 5.2的0.1 mol/L 乙酸钠缓冲液,涡旋混匀5 min,并置于95 °C水浴中均匀糊化30 min。反应结束后立即放入37 °C水浴中,待温度平衡后加入5粒玻璃珠,水平放入恒温振荡器,加入0.75 mL 混酶,开始振荡反应(160 r/min)并准确计时。在20 min、120 min 分别从COD管中取出0.5 mL 水解液于装有20 mL 66%乙醇的离心管中灭酶,涡旋混匀,并于4000 r/min 离心10 min。离心后的上清液用GOPOD法在510 nm 处测定葡萄糖含量。淀粉各营养片段的计算公式如下:

$$RDS(\%) = (G_{20} - FG) \times 0.9 / TS$$

$$SDS(\%) = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 / TS$$

$$RS(\%) = 1 - (RDS + SDS) / TS$$

注: G_{20} 为淀粉酶水解20 min后产生的葡萄糖含量, mg; FG 为酶水解处理前淀粉中游离葡萄糖含量, mg; G_{120} 为淀粉酶水解120 min后产生的葡萄糖含量, mg; TS 为总淀粉含量, mg。

1.4 淀粉样品的碘吸附及波长扫描^[8]

称取2.0 g 碘化钾,加适量蒸馏水形成饱和溶液,加入0.2 g 碘,待碘全部溶解后将溶液定量转移至100 mL 容量瓶中,加水至刻度、摇匀,低温避光保存。

称取0.08 g 淀粉样品于20 mL 二甲基亚砜中,加

热溶解后取 1 mL 样品溶液转移至 100 mL 蒸馏水中, 混匀, 静置。取出 3 mL, 并加入 75 μ L 碘试剂, 摇匀后立即倒入比色皿中。扫描范围为 500~750 nm, 扫描间隔为 1 nm, 扫描速度为慢速, 得到淀粉-碘吸附结合物的吸收曲线。

1.5 X 射线衍射

将玉米慢消化淀粉样品置于相对湿度为 100% 的干燥器中平衡 12 h, 以消除水分对其结晶度的影响。取一定量已平衡好的样品置于 X 射线衍射仪进行测定。测试条件为: 起始角 7° , 终止角 35° , 扫描步长 0.04° , 扫描速度 $5^\circ/\text{min}$, 入射线波长 0.15 nm, 靶型 Cu, 滤波片 Ni, 管压 40 kV, 管流 40 mA。

1.6 淀粉颗粒热力学性质

采用差示扫描量热仪测定淀粉的热性质。准确称取 3 mg 淀粉样品于样品盘中, 加入适量的蒸馏水配成质量浓度为 30% 的淀粉乳溶液, 立即将样品盘压紧密封, 室温下平衡 4 h。以空白样品盘做参比, $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温, 在 30°C 保温 1 min, 从 30°C 升温到 150°C , 用 Pyris 软件分别计算出样品的 T_0 (起始温度)、 T_p (峰值温度)、 T_c (终止温度) 及 ΔH (糊化焓) 等。

1.7 淀粉的颗粒形貌分析

将待测淀粉样品置于 105°C 的烘箱中干燥 4 h, 用导电双面胶将其固定在样品台上, 喷金处理后, 置于扫描电镜中观测并拍摄淀粉颗粒形貌。

1.8 数据分析处理

各组实验数据均为 3 次重复测定之后的平均值, 并用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 β -淀粉酶添加量对慢消化淀粉含量的影响

表 1 不同 β -淀粉酶添加量对慢消化淀粉含量的影响

Table 1 Effect of the amount of β -amylase on SDS content

| 样品 | RDS 含量/% | SDS 含量/% | RS 含量/% |
|-----|------------------|------------------|------------------|
| B10 | 80.30 \pm 0.52 | 4.12 \pm 0.43 | 15.58 \pm 0.81 |
| B15 | 79.79 \pm 0.61 | 4.83 \pm 0.78 | 15.38 \pm 0.64 |
| B20 | 70.99 \pm 0.88 | 16.37 \pm 1.2 | 12.64 \pm 1.56 |
| B25 | 76.22 \pm 0.63 | 13.74 \pm 0.85 | 10.04 \pm 0.98 |
| B30 | 82.66 \pm 1.32 | 7.36 \pm 0.54 | 9.98 \pm 0.44 |

β -淀粉酶只能从分子链尾端开始水解, 可切断 α -1,4 糖苷键, 得到麦芽糖单位, 使得淀粉链长被缩减, 短淀粉链的分子增多, 在葡萄糖苷转移酶的作用过程中容易形成慢消化淀粉。 β -淀粉酶添加量对慢消化淀粉含量的影响如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 当 β -淀粉酶添加量小于 20 mL 时, SDS 含量随着加酶量的增加而增加, 当 SDS 含量达到最高值 16.37% 时, 继续加大 β -淀粉酶的用量, SDS 含量反而下降。这是由于经过 β -淀粉酶处理的淀粉, 直链淀粉和支链淀粉外链的长度被缩短, 形成密集分支链, 从而改变了淀粉的慢消化功能^[9]。淀粉的分支程度不同, SDS 含量变化明显。 β -淀粉酶添加量直接影响淀粉的平均链长, 添加量较低会使得淀粉不能被有效的水解成短链分子, 不利于葡萄糖苷转移酶的转移; 添加量过高, 淀粉分子充分水解, 产生大量过短的淀粉链, 会起到抑制作用, 不易于淀粉链的进一步靠近, 从而不利于 SDS 的形成。只有适量 β -淀粉酶的添加, 可以更好的形成特定的淀粉分支结构, 从而减缓淀粉的消化速率, 得到较高含量的 SDS。同时, 随着 β -淀粉酶添加量的增多, RDS 含量呈现先降低后增加的趋势, 且在 β -淀粉酶添加量为 20 mL 时有最小值; 而所有样品的 RS 含量则不断降低。Zhang 等^[10]研究表明 SDS 与 RS 在结构上比较相像, 而与 RDS 则有着本质上的区别, 因此, 降低 RDS 的含量也可达到制备高含量慢消化淀粉的目的。

2.2 葡萄糖苷转移酶添加量对慢消化淀粉含量的影响

葡萄糖苷转移酶提高 SDS 含量的原理是葡萄糖苷转移酶可催化低聚麦芽糖的水解并促进其发生转移, 得到更多侧链的多分支结构的糖苷键, 淀粉的分支密度增加, 从而减缓淀粉的消化速率^[11]。

表 2 不同葡萄糖苷转移酶添加量对慢消化淀粉含量的影响

Table 2 Effect of the amount of transglucosidase on SDS content

| 样品 | RDS 含量/% | SDS 含量/% | RS 含量/% |
|-----|------------------|------------------|------------------|
| T10 | 78.27 \pm 1.32 | 6.70 \pm 1.42 | 15.03 \pm 0.99 |
| T15 | 75.43 \pm 0.65 | 9.90 \pm 1.01 | 14.67 \pm 1.24 |
| T20 | 70.99 \pm 0.98 | 16.37 \pm 1.34 | 12.64 \pm 0.87 |
| T25 | 73.84 \pm 0.62 | 8.25 \pm 0.96 | 17.91 \pm 1.20 |
| T30 | 74.57 \pm 1.02 | 7.24 \pm 0.84 | 18.19 \pm 1.41 |

如表 2 所示, 葡萄糖苷转移酶加酶量由 10 mL 增加至 20 mL 时, SDS 含量逐渐升高, 在加酶量为 20 mL 时达到最高值 16.37%, 但是当葡萄糖苷转移酶添加

量达到一定限度时,加酶量增加反而会抑制 SDS 的形成,呈现下降趋势,这与 β -淀粉酶添加量一样。这是由于葡萄糖苷转移酶加酶量较低,无法促使经 β -淀粉酶作用后的短淀粉链的分支充分转移,淀粉的分支密度较低,淀粉的消化性能不能被有效改善;当葡萄糖苷转移酶加酶量较高时,可能由于分支密度过高,反而不利于形成有序牢固的多分支结构。由此可见,只有特定程度的加酶量,才能获得较高含量的 SDS。同时,随着葡萄糖苷转移酶加酶量的增加,RDS 和 RS 含量都是先降低后升高,并且在 20 mL 处分别有最小值 70.99% 和 12.64%。由此可见,葡萄糖苷转移酶加酶量的不同也会影响 RDS 和 RS 的含量的变化,这与 Ao 等^[7]的研究结果基本一致。

2.3 淀粉样品的碘吸附

淀粉分子具有螺旋状的卷曲,当碘分子与淀粉相接触时,碘分子可借助范德华力进入淀粉分子的螺旋中心,使得直链淀粉束缚大量的碘分子,形成了淀粉-碘复合物,在可见光范围内呈现最大的光吸收,因而呈蓝色^[12],且淀粉的平均链长越短,淀粉在最大吸收处的波长越小。

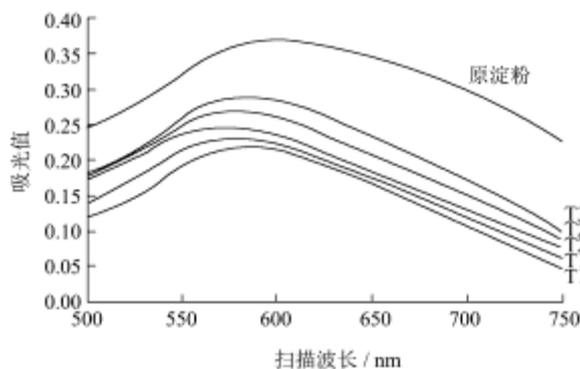


图1 淀粉-碘吸附结合物吸收曲线

Fig.1 Wavelength scanning profiles of starch samples binding iodine

从图1可以看出,玉米原淀粉的吸光度值要远远高于经过双酶处理后样品的吸光度值,且在 598 nm 处出现最大吸收峰。而其他样品的吸光度值和最大吸收峰均有所偏移,但变化趋势基本保持一致。T10、T15、T20、T25、T30 吸光度值逐渐上升,这与葡萄糖苷转移酶加酶量呈现线性关系,可能是由于淀粉分支密度的改变,影响了碘分子与淀粉的吸附能力^[13],致使光吸收略有加强。与原淀粉相比,所有样品的最大吸收峰的位置都向短波长方向进行了偏移,均出现在 572~585 nm 之间,且相对偏移程度为从 T10 到 T20 逐渐增大,T20 到 T30 逐渐减小,其中 T20 偏移最大,最大吸收峰处的波长仅为 572 nm,可见偏移程度越

大,慢消化淀粉含量越高。熊珊珊等^[8]研究葡萄糖苷转移酶的处理时间长短对淀粉-碘吸附能力的影响时,也指出吸收峰的偏移程度与 SDS 含量的变化一致。

2.4 X 射线衍射

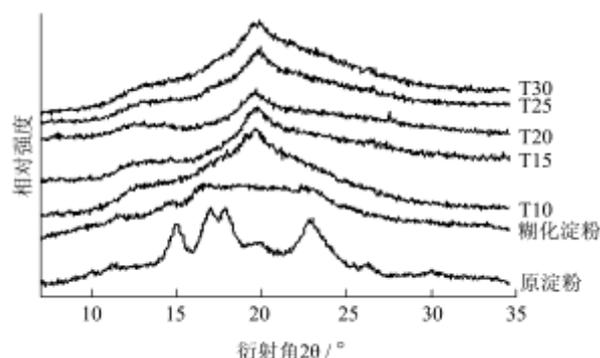


图2 玉米原淀粉及样品的 X 射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction patterns of native starch and samples

由图2可知,玉米原淀粉属于典型的 A 型结晶结构,其在 X 射线衍射图谱上的 15.1°、17.1°、18.0°、22.9° 处出现较强的衍射峰。糊化处理后的淀粉在图谱上不出现衍射峰,这表明淀粉经过糊化处理后,属于无定型态结构。而经过双酶处理后的所有淀粉样品,不属于任一典型的结晶结构,仅在 $2\theta=19.8^\circ$ 附近出现尖锐的衍射峰,在 $2\theta=13.1^\circ$ 附近有一弥散峰。Casarrubias 等^[14]用 β -淀粉酶和葡萄糖苷转移酶共同处理芒果淀粉的研究也表明,淀粉经过双酶处理后晶型消失。

2.5 淀粉颗粒热力学性质

表3 不同样品的热力学性质参数

Table 3 Thermal parameters of native and treated starches

| 样品 | 起始温度 $T_0/^\circ\text{C}$ | 峰值温度 $T_p/^\circ\text{C}$ | 终止温度 $T_c/^\circ\text{C}$ | 起始与终止温度差 $T_c-T_0/^\circ\text{C}$ | 糊化焓 $\Delta H/(\text{J/g})$ |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 原淀粉 | 71.49 | 77.45 | 84.61 | 13.12 | 11.02 |
| 糊化淀粉 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T10 | 104.70 | 120.88 | 128.74 | 24.04 | 2.81 |
| T15 | 108.65 | 124.58 | 131.02 | 22.37 | 7.82 |
| T20 | 110.87 | 125.72 | 132.59 | 21.72 | 8.08 |
| T25 | 107.57 | 124.34 | 130.19 | 22.62 | 5.81 |
| T30 | 106.91 | 121.78 | 129.65 | 22.74 | 4.49 |

从表3可以看出,与原淀粉相比,糊化处理后的淀粉没有出现吸收峰,说明淀粉经过完全糊化后,不发生相转变现象。而所有慢消化淀粉样品的糊化起始温度 T_0 、峰值温度 T_p 、终止温度 T_c 、起始与终止温度差 T_c-T_0 均有显著的提高,由此可见,经过双酶处

理后的样品, 淀粉的内部结构发生改变, 链长和分支密度的改变在影响 SDS 含量的同时, 多分支结构的增加也会使得淀粉的糊化愈加困难, 说明 SDS 含量越高的样品越难糊化。 T_c-T_0 的变化反映淀粉颗粒内部结构的差异程度, T_c-T_0 越大表明差异程度越大^[15], 随着 SDS 含量的增加, T_c-T_0 逐渐减小, 这是因为淀粉内部分支结构趋向于紧密有序的方式排列、完善程度差异变小的缘故。糊化焓(ΔH)指的是在给定温度下体系趋向于达到自由能最小的状态时, 伴随着结构变化所发生的热焓的改变。Cooke 等^[16]认为 ΔH 主要反映的是双螺旋结构的破坏, 而不是晶体的破坏。缪铭^[17]也指出经过酶解得到的 SDS 是由一小部分支链淀粉短链构成的双螺旋有序结构和大部分无定型区构成的。经过酶解的样品晶体被破坏, 可能存在部分双螺旋结构, 因此所有样品的焓值比原淀粉小。样品 T20 在所有样品中有最高的峰值温度 (125.72 °C) 和糊化焓 (8.08J/g), 表明 SDS 含量越高的样品, 其双螺旋结构越稳定, 热稳定性越好。

2.6 淀粉颗粒形貌变化

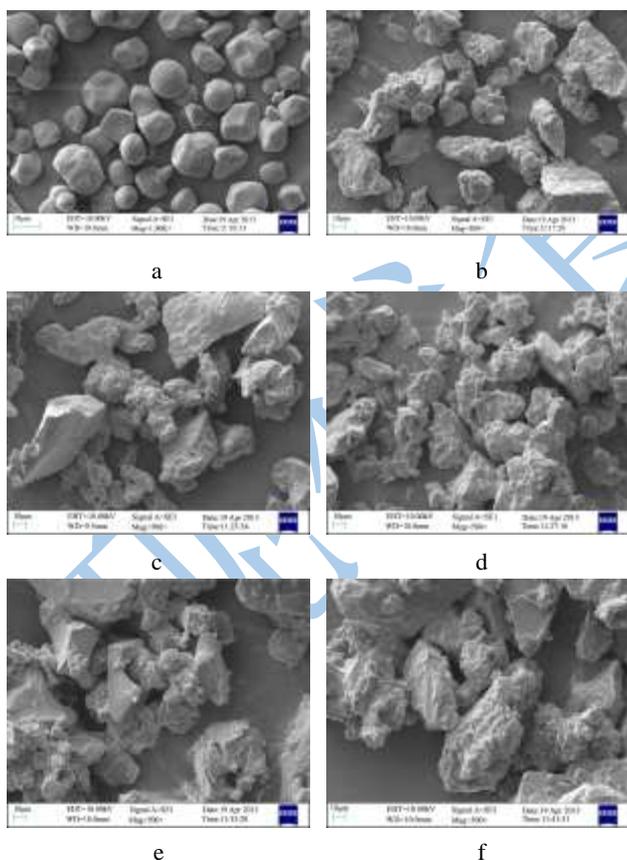


图3 玉米原淀粉及酶解淀粉样品的扫描电镜照片

Fig.3 Scanning electron micrographs of native and treated starches

注: a: 玉米原淀粉 ($\times 1000$), b: T10 ($\times 500$), c: T15

($\times 500$), d: T20 ($\times 500$), e: T25 ($\times 500$), f: T30 ($\times 500$)。

利用扫描电子显微镜对淀粉样品的形貌进行研究分析, 考察玉米淀粉在酶解前后淀粉颗粒的表面微观结构的变化情况, 结果如图3所示。玉米淀粉经过糊化和双酶处理后, 颗粒大小和形状都发生了显著变化。玉米原淀粉颗粒的大小为 5~20 μm , 多为实心圆或多角形, 表面结构紧密, 棱角光滑。与原淀粉形貌完全不同, 经过糊化、双酶处理后的 SDS 淀粉样品, 不再具有原淀粉的颗粒结构, 均呈现出不规则的碎片状, 碎片大小约为 20~50 μm 。这可能是淀粉在高温糊化时, 颗粒结构被破坏。

3 结论

本实验研究了双酶协同作用制备慢消化淀粉, 当 β -淀粉酶加酶量为 20 mL、反应时间 4 h, 再经过葡萄糖苷转移酶加酶量为 20 mL、反应时间 12 h, 可使 SDS 含量从 3.79% 提高到 16.37%。经过双酶处理后的样品, 随着慢消化淀粉含量增加, 淀粉-碘吸附结合物的最大吸收峰位置的偏移逐渐增大; 热稳定性增强, 淀粉糊化变得困难; 与玉米原淀粉 A 型结晶结构相比, 经过双酶处理的样品晶型消失, 仅在 $2\theta=19.8^\circ$ 附近出现尖锐的衍射峰, 在 $2\theta=13.1^\circ$ 附近有一弥散峰; 扫描电镜结果显示酶解后的样品变成不规则碎片, 颗粒结构破坏。试验证明, β -淀粉酶和葡萄糖苷转移酶协同处理普通玉米淀粉, 可以有效的提高慢消化淀粉的含量, 改善淀粉的消化性能, 为制备玉米慢消化淀粉的深入研究提供实验条件和理论基础。

参考文献

- [1] Englyst H N, Kingman S, Cummings J. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(12): 33-50
- [2] Chung H J, Liu Q, Hoover R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches [J]. *Carbohydrate polymers*, 2009, 75: 436-447
- [3] 闵伟红, 刘舟, 姜宏宇, 等. 玉米缓慢消化淀粉理化性质研究 [J]. *食品科学*, 2009, 30(15): 26-29
Min W H, Liu Z, Jiang H Y, et al. Physico-chemical Properties of Slowly Digestible Maize Starch [J]. *Food Science*, 2009, 30(15): 26-29
- [4] Ma Y, Cai C, Wang J, et al. Enzymatic hydrolysis of corn starch for producing fat mimetics [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 73: 297-303

- [5] Ota M, Okamoto T, Wakabayashi H. Action of transglucosidase from *Aspergillus niger* on maltoheptaose and [$U-^{13}C$] maltose [J]. Carbohydrate Research, 2009, 344: 460-465
- [6] 于国萍, 连莲. 利用 α -淀粉酶和 β -淀粉酶制备缓慢消化淀粉 [J]. 东北农业大学学报, 2011, 42: 1-6
Yu G P, Lian L. Preparation of slowly digestible starch by α -amylase and β -amylase [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42: 1-6
- [7] Ao Z H, Simsek S, Zhang G Y, et al. Starch with a slow digestion property produced by altering its chain length, branch density, and crystalline structure [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2007, 55: 4540-4547
- [8] 熊珊珊, 缪铭, 江波. 双酶处理对玉米淀粉链结构和消化性的影响 [J]. 食品工业科技, 2012, 33: 127-130
Xiong S S, Miao M, Jiang B. Effect of dual-enzymes treatment on chain structure and digestibility of maize starch [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33: 127-130
- [9] Zhang G Y, Ao Z H, Hamaker B R. Slow digestion property of native cereal starches [J]. Biomacromolecules, 2006, 7: 3252-3258
- [10] Zhang G Y, Hamaker B R. Slowly digestible starch: concept, mechanism, and proposed extended glycemic index [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2009, 49: 852-867
- [11] Chiba S. Handbook of amylases and related enzymes [M]. Pergamon Press: Oxford, 1988
- [12] Bailey J, Whelan W. Physical properties of starch I. Relationship between iodine stain and chain length [J]. Journal of Biological Chemistry, 1961, 236: 969-973
- [13] Waduge R, Xu S, Seetharaman K. Iodine absorption properties and its effect on the crystallinity of developing wheat starch granules [J]. Carbohydrate polymers, 2010, 82: 786-794
- [14] Casarrubias-Castillo M G, Hamaker B R, Rodriguez-Ambriz S L, et al. Physicochemical, structural, and digestibility properties of enzymatic modified plantain and mango starches [J]. Starch, 2012, 64: 304-312
- [15] Vasanthan T, Bhatta R S. Physicochemical properties of small-and large-granule starches of waxy, regular, and high-amylose barleys [J]. Cereal Chemistry, 1996, 73(2): 199-207
- [16] Cooke D, Gidley M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition [J]. Carbohydrate Research, 1992, 227: 103-112
- [17] 缪铭. 慢消化淀粉的特性及形成机理研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009
Miao M. Characteristic and formation mechanism of slowly digestible starch [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009