

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.06.005

处理条件对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

The effects of different treatments on the stability of the sesaminol-triglucoside

朱秀灵¹ 戴清源¹ 王 枫¹ 陶仁友¹

ZHU Xiu-ling¹ DAI Qing-yuan¹ WANG Feng¹ TAO Ren-you¹

曹昕昕¹ 许祚文² 张志祥²

CAO Xin-xin¹ XU Zuo-wen² ZHANG Zhi-xiang²

(1. 安徽工程大学生物与化学工程学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 芜湖益然香木榨食用油有限公司, 安徽 芜湖 241100)

(1. School of Biological and Chemical Engineering, Anhui Polytechnic University, Beijing Middle Road, Wuhu, Anhui 241000, China; 2. Wuhu Yiranxiang Wood-pressed Edible Oil Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241100, China)

摘要:探讨光、热、氧(空气)、酸、碱、酶及高压蒸汽处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响。结果发现,光、热、氧(空气)、碱液(氢氧化钠)、高压蒸汽及 α -葡萄糖苷酶处理对芝麻素酚三糖苷稳定性无显著性影响,盐酸、 β -葡萄糖苷酶、 α -半乳糖苷酶及 β -半乳糖苷酶处理均可导致芝麻素酚三糖苷稳定性显著性降低。表明芝麻素酚三糖苷在特定的酸或酶作用下不稳定,可以转化为其他物质。

关键词:芝麻素酚三糖苷;稳定性;不同处理

Abstract: The effects of light, heat, oxygen (air), acid, alkali, enzyme and high temperature and high pressure on the stability of the sesaminol-triglucoside were investigated in this study. The results showed that the light, heat, oxygen (air), alkali (sodium hydroxide), high temperature and high pressure, and α -glucosidase treatments had no significant effects on the stability of the sesaminol-triglucosides. However, the hydrochloric acid, β -glucosidase, α -galactosidase and β -galactosidase treatments resulted in significant decreases in the stability of sesaminol triglucoside. It was indicated that sesaminol-triglucoside was unstable under the treatment of specific acid or enzyme, and could be converted into other compounds.

Keywords: sesaminol-triglucoside; stability; different treatments

芝麻素酚三糖苷是由三分子葡萄糖与一分子芝麻素

酚以糖苷键连接而成,是芝麻饼粕中含量最高的一种水溶性木酚素^[1-2]。与脂溶性木酚素如芝麻素、芝麻林素和芝麻素酚等相比,芝麻素酚三糖苷水溶性较好,体外抗氧化活性较弱^[3-4],但在体内肠道菌群及 β -葡萄糖苷酶作用下可以转化为具有较强抗氧化活性的芝麻素酚及其他酚类化合物,能够降低机体氧化应激水平^[2,5-6],对机体健康发挥有益作用。

作为膳食成分,芝麻素酚三糖苷通常以脱皮或未脱皮芝麻籽、芝麻酱、芝麻芽菜等食物形式被人体摄入,在这些食物加工过程中,芝麻籽可能经过酸碱脱皮、高温焙炒、高压蒸煮、高温油炸、温控发芽等一种或多种处理,致使芝麻素酚三糖苷分子也不同程度地受到光、热、氧(空气)、酸、碱、酶及高压蒸汽的影响。目前已有研究^{[7]27-37}[8]报道芝麻素酚三糖苷能被 β -葡萄糖苷酶水解生成芝麻素酚,而对其他因素如光、热、氧、酸碱及高压蒸汽是否稳定,尚未见相关报道。本研究以实验室自制芝麻素酚三糖苷提取物为研究对象,探讨光、热、氧、酸、碱、酶及高压蒸汽处理对芝麻饼粕提取物中芝麻素酚三糖苷稳定性的影响,以期为进一步探讨芝麻素酚三糖苷在多种因素作用下的稳定性和转化规律提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

芝麻饼粕:芜湖益然香木榨食用油有限公司;

α -葡萄糖苷酶(来源于黑曲霉,71 U/mg)、 α -半乳糖苷酶(≥ 9 U/mg)、 β -半乳糖苷酶(300 U/mg):中国 Sigma-Aldrich 公司;

β -葡萄糖苷酶(来源于黑曲霉):110 U/g,上海麦克

基金项目:安徽省自然科学基金(编号:1608085MC71, 1608085MC72);安徽省高校自然科学基金项目(编号:KJ2016A065, KJ2018A0105);芜湖市科技计划项目(编号:2015hm17)

作者简介:朱秀灵,女,安徽工程大学副教授,博士。

通信作者:戴清源(1980—),男,安徽工程大学副教授,博士。

E-mail: daiqingyuan9@126.com

收稿日期:2018-05-27

林生化科技有限公司;

正己烷、无水乙醇、盐酸、氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

芝麻素酚三糖苷标准品:HPLC 纯度 98%以上,实验室自制。

1.1.2 仪器与设备

鼓风干燥箱:ZFD-A5140 型,上海智城分析仪器制造有限公司;

万能粉碎机:FW-100 型,金坛市杰瑞尔电器有限公司;

往返式气浴恒温振荡器:SHA-S 型,金坛市杰瑞尔电器有限公司;

台式低速大容量离心机:L-550 型,湖南湘仪离心机仪器有限公司;

多功能循环水真空泵:SHZ-III 型,郑州上街华科仪器厂;

液相色谱仪:LC-2010 型,日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 芝麻素酚三糖苷提取物的制备 参照 Zhu 等^[9]方法制备芝麻饼粕提取物,具体如下:将芝麻饼粕于 50 °C 鼓风干燥 6 h,万能粉碎机粉碎,过 60 目筛,按料液比 1:10(g/mL)加入正己烷,于气浴振荡器(120 r/min)中室温脱脂 8 h,离心(4 500 r/min,10 min),收集上清液,残渣以相同方式脱脂 2 次,上清液合并、减压蒸发,回收正己烷并得到芝麻油,残渣自然风干即为脱脂芝麻粕。称取一定质量的脱脂芝麻粕按料液比 1:10(g/mL)加入 80%乙醇,于气浴振荡器(120 r/min)中室温浸提 8 h,离心(4 500 r/min,10 min),收集上清液,沉淀以相同方式浸提 2 次,将上清液合并、减压浓缩、真空干燥,即得到芝麻饼粕提取物。将芝麻饼粕提取物用蒸馏水溶解并配成浓度为 10 mg/mL 溶液,0.45 μm 滤膜过滤,进行聚酰胺柱层析(3.0 cm×60 cm),每次上样 10 mL,蒸馏水洗脱,洗脱流速 1.0 mL/min,洗脱液用自动部分收集器收集(10 mL/管),高效液相色谱法检测洗脱液中芝麻素酚三糖苷,将含有芝麻素酚三糖苷组分的洗脱液合并,减压浓缩,真空干燥即得到芝麻素酚三糖苷提取物。

1.2.2 芝麻素酚三糖苷含量的测定 将芝麻素酚三糖苷提取物用 80%乙醇溶解并定容至 10 mL,0.45 μm 滤膜过滤,采用高效液相色谱法(HPLC)测定溶液中芝麻素酚三糖苷的含量^[9],色谱条件:色谱柱 TSKgel ODS-80T(s)(4.6 mm×250 mm),紫外检测器,检测波长 290 nm,流速 0.6 mL/min,柱温 35 °C,进样量 20 μL,每个样品检测时间 30 min,流动相:A 相为甲醇,B 相为水,A 相与 B 相体积比 6:4。

精确称取 10 mg 芝麻素酚三糖苷标准品,用 80%乙醇溶解并定容至 25 mL 得到 400 μg/mL 标准品母液,用

80%乙醇稀释分别得到浓度为 5,20,40,80,100 μg/mL 的标准溶液,高效液相色谱检测,以峰面积为纵坐标,以浓度为横坐标,绘制标准曲线。按照保留时间是否与标准品一致对待测液中芝麻素酚三糖苷进行定性分析,根据峰面积,由标准曲线计算出待测液中芝麻素酚三糖苷的含量。芝麻素酚三糖苷提取物中芝麻素酚三糖苷的含量按式(1)计算。

$$\omega = \frac{C \times V}{1\,000 \times m}, \quad (1)$$

式中:

ω ——芝麻素酚三糖苷提取物中芝麻素酚三糖苷的含量,mg/g;

C ——待测液中芝麻素酚三糖苷浓度,μg/mL;

V ——待测液的体积,mL;

m ——芝麻素酚三糖苷提取物的质量,mg。

1.2.3 光、热、氧(空气)对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

参照文献[10—11]报道的方法并加以修改,具体描述如下:准确称取 30 mg 芝麻素酚三糖苷提取物,用蒸馏水溶解并配成浓度为 200 μg/mL 溶液。等量量取该溶液各 10 mL 分别放入 10 个 25 mL 的带塞玻璃试管中,将其中 8 只试管用保鲜膜封口,分别放在试验台上、避光处、光照箱、水浴锅(设定温度 100 °C)中各 2 管,再将剩余的 2 管置于气浴振荡器中以 200 r/min 往复震荡,有利于样品与空气中的氧充分接触。其中,试验台、避光、光照箱及水浴试验,分别考察常规操作、暗光、光照操作及热处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响。将不同处理条件下的样品分别于 8 h 及 24 h 各取出 1 管,用高效液相色谱检测芝麻素酚三糖苷的含量,检测结果与 0 h 时芝麻素酚三糖苷含量进行比较,结果以芝麻素酚三糖苷的保存率表示。

1.2.4 盐酸对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响 参照文献[12]采用高浓度盐酸水解的方法,并加以修改,具体描述如下:准确称取 10 mg 芝麻素酚三糖苷提取物,按料液比 1:5(mg/mL)加入 4.5 mol/L 盐酸溶液,充分震荡。等量量取该溶液 10 mL 分别放到 2 个 25 mL 的带塞玻璃试管中并于 37 °C 恒温水浴中分别酸解 8 h 和 24 h,用 2 mol/L NaOH 溶液调节各样品 pH 至 7.0(调节 pH 至中性,便于高效液相色谱检测),记录溶液体积,用 0.45 μm 滤膜分别过滤,进行高效液相色谱检测,检测结果与 0 h 时芝麻素酚三糖苷含量进行比较,结果以芝麻素酚三糖苷的保存率表示。

1.2.5 碱液(氢氧化钠)对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

参照文献[13]采用 4.5 mol/L NaOH 溶液处理芝麻素酚三糖苷溶液,具体方法描述如下:将 10 mg 芝麻素酚三糖苷提取物,按料液比 1:5(mg/mL)加入 4.5 mol/L NaOH 溶液,充分震荡。然后采用与盐酸处理相同的方

法进行碱液处理。各样品经碱液处理后,用 2 mol/L 盐酸调节 pH 至 7.0,再用 0.45 μm 滤膜过滤,进行高效液相色谱检测,计算芝麻素酚三糖苷的保存率。

1.2.6 酶液处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响 采用 pH 5.0 醋酸缓冲溶液分别配制 α -半乳糖苷酶^[14]、 β -半乳糖苷酶^[15]、 α -葡萄糖苷酶^[16] 和 β -葡萄糖苷酶溶液^[2],各种酶液的终浓度均为 2.0 mg/mL。将 10 mg 等量份的芝麻素酚三糖苷提取物分别加入到上述酶液(各 50 mL)中,充分震荡使其溶解,等量量取各溶液 10 mL 2 份,分别放到 2 个 25 mL 的带塞玻璃试管中,于 37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温震荡酶解,各酶酶解时间分别为 8, 24 h,酶解结束将样品煮沸 5 min 钝化酶,冷却至室温,0.45 μm 滤膜过滤,进行高效液相色谱检测,以各酶作用时间为 0 h 时的溶液作为对照,计算芝麻素酚三糖苷的保存率。

1.2.7 高压蒸汽处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

参照 Xu 等^[17]报道的方法,并加以修改,具体如下:将 10 mg 芝麻素酚三糖苷提取物按料液比 1:5 (mg/mL) 加入蒸馏水溶解,其浓度为 200 $\mu\text{g/mL}$ 溶液,等量量取 10 mL 各 3 份置于 25 mL 试管中,分别放入高压蒸汽灭菌锅中于 1.01×10^5 Pa、121 $^{\circ}\text{C}$ 处理 30 min。将处理后的溶液用 0.45 μm 滤膜过滤,进行高效液相色谱检测,以未高压蒸汽处理的溶液作为对照,计算芝麻素酚三糖苷的保存率。

1.2.8 芝麻素酚三糖苷的稳定性评价 不同处理条件下芝麻素酚三糖苷的稳定性,可以根据高效液相色谱特征峰面积变化以及是否出现新的特征峰进行判断,在量变上表现为不同方法处理前后芝麻素酚三糖苷含量的变化即保存率不同。本研究以芝麻素酚三糖苷的保存率表示其稳定性,计算公式:

$$d = \frac{C_1 \times V_1}{C_0 \times V_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

d ——芝麻素酚三糖苷的保存率, %;

C_0 ——不同方法处理前芝麻素酚三糖苷的含量, $\mu\text{g/mL}$;

C_1 ——不同方法处理后芝麻素酚三糖苷的含量, $\mu\text{g/mL}$;

V_0 ——不同方法处理前溶液的体积, mL;

V_1 ——不同方法处理后溶液的体积, mL。

1.3 数据分析

试验均重复 3 次,结果以(平均值 $\pm$ 标准偏差)表示。采用 SPSS V22.0 (IBM-SPSS, USA) 软件对试验数据进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 芝麻素酚三糖苷标准曲线的绘制及含量测定

芝麻素酚三糖苷的标准曲线如图 1 所示,线性方程

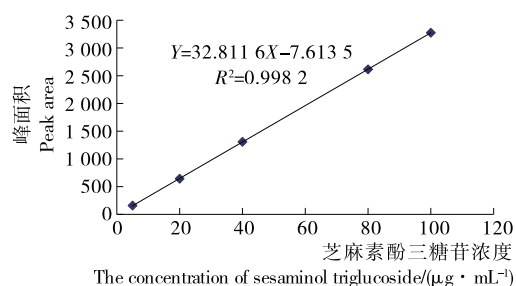


图 1 芝麻素酚三糖苷标准曲线

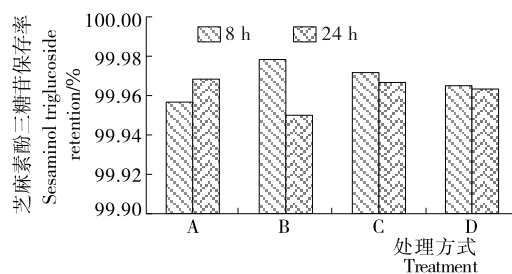
Figure 1 Standard curve of sesaminol triglucoside

为 $Y = 32.811\ 6X - 7.613\ 5$ ($R^2 = 0.998\ 2$),线性范围 5~100 $\mu\text{g/mL}$ 。

根据线性方程计算得出脱脂芝麻饼粕中芝麻素酚三糖苷含量为 (1.08 ± 0.05) mg/g, 80% 乙醇提取物即芝麻饼粕提取物中芝麻素酚三糖苷含量为 (3.16 ± 0.11) mg/g, 经聚酰胺柱层析初步纯化得到芝麻素酚三糖苷提取物,该提取物中芝麻素酚三糖苷含量为 (476.11 ± 7.52) mg/g。

2.2 光、热、氧(空气)对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

已有研究^[18-19]报道,在芝麻籽加热焙炒、芝麻油精制操作如酸性粘土脱色或者酸性离子交换树脂催化作用下,芝麻林素可以转换为芝麻素酚,而芝麻素酚三糖苷在热处理条件下的稳定性未见报道。本研究中光、热、氧对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响,如图 2 所示。室温、避光、光照及水浴处理后,芝麻素酚三糖苷的保存率均在 99.94% 以上,处理方式及处理时间对芝麻素酚三糖苷保存率的影响不显著 ($P > 0.05$),说明在本试验条件下,芝麻素酚三糖苷对光、热、氧(空气)非常稳定。



A、B、C、D 分别表示室温、避光、光照及水浴处理

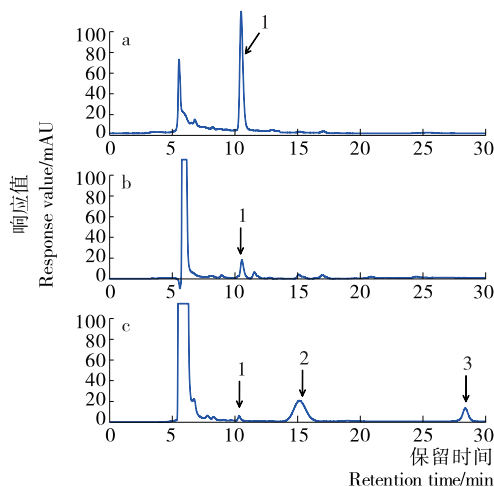
图 2 光、热、氧处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

Figure 2 Effect of light, heat, oxygen treatment on the stability of sesaminol triglucoside

2.3 盐酸处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

如图 3 所示,盐酸处理时间由 0 h 增大至 24 h,芝麻素酚三糖苷特征峰越来越小,当盐酸处理 24 h 时,芝麻素酚三糖苷特征峰最小,并且出现了化合物 2 和化合物 3 的特征峰。根据高效液相色谱图中芝麻素酚三糖苷对应的峰面积,以盐酸处理 0 h 时芝麻素酚三糖苷含量为对照,由式(1)、(2)分别计算得出盐酸处理 8, 24 h 芝麻素酚

三糖苷的保存率分别为 23.85% 和 4.27% (见图 9), 结果表明, 高浓度盐酸处理导致芝麻素酚三糖苷结构不稳定, 使其结构降解或转化为其他化合物, 与文献[7]⁷报道不一致。文献[7]⁷报道, 在酸性条件 (pH 0.8~1.5, HCl) 下芝麻素酚三糖苷无水解现象, 而且除了 3 个新的色谱峰, 并未检测到相应的芝麻素酚或者其他芝麻素酚糖苷化合物, 据猜测, 3 个新的色谱峰可能是芝麻素酚的同分异构体。本研究中, 芝麻素酚三糖苷经高浓度盐酸处理后产生 2 个新的特征峰, 分别对应化合物 2 和化合物 3, 有待于进一步鉴定其化学结构。



a、b、c 分别为处理 0, 8, 24 h 时溶液的高效液相色谱图; 峰 1 为芝麻素酚三糖苷; 峰 2 和 3 分别为新化合物

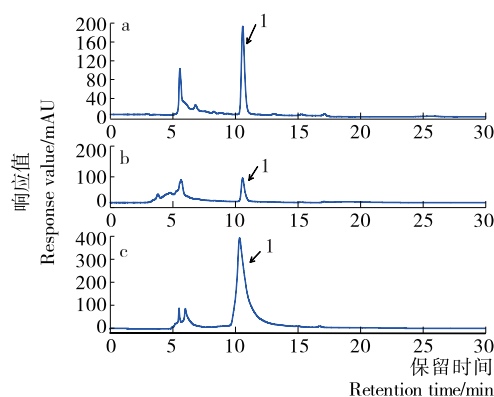
图 3 盐酸处理芝麻素酚三糖苷提取物的 HPLC 色谱图
Figure 3 HPLC chromatograms of sesaminol triglucoside extract with hydrochloric acid treatment

2.4 碱液 (氢氧化钠) 处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

由图 4 可以看出, 芝麻素酚三糖苷经高浓度碱液处理未出现新的特征峰, 随着碱液处理时间的延长芝麻素酚三糖苷特征峰面积随之增大, 说明碱液处理对芝麻素酚三糖苷无破坏作用。根据峰面积大小, 以碱液处理 0 h 时芝麻素酚三糖苷含量为对照, 由式 (1)、(2) 分别计算出碱液处理 8, 24 h 时芝麻素酚三糖苷的保存率分别为 118.31% 和 146.84% (见图 9)。峰面积随着碱液处理时间延长不仅未减少反而增加, 其原因可能是芝麻素酚三糖苷不纯, 其提取物中非芝麻素酚三糖苷成分在高浓度碱液作用下发生转化, 转化产物与芝麻素酚三糖苷有着相近的保留时间, 峰面积增大可能是保留时间相近的多个组分叠加的结果。

2.5 酶处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

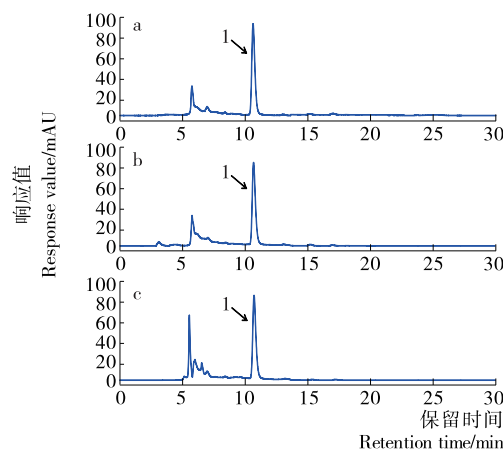
α -葡萄糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、 α -半乳糖苷酶及 β -半乳糖苷酶对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响, 如图 5~9 所示。



a、b、c 分别为处理 0, 8, 24 h 时溶液的高效液相色谱图; 峰 1 为芝麻素酚三糖苷

图 4 碱液处理芝麻素酚三糖苷提取物的 HPLC 色谱图

Figure 4 HPLC chromatograms of sesaminol triglucoside extract with alkali treatment



a、b、c 分别为处理 0, 8, 24 h 时溶液的高效液相色谱图; 峰 1 为芝麻素酚三糖苷

图 5 α -葡萄糖苷酶处理芝麻素酚三糖苷提取物的 HPLC 色谱图

Figure 5 HPLC chromatograms of sesaminol triglucoside extract with α -glucosidase treatment

由图 5、9 可以看出, α -葡萄糖苷酶处理前后, 芝麻素酚三糖苷的特征峰相似, 其含量无显著性变化 ($P > 0.05$), 保存率在 8 h 或 24 h 时均为 99.92% 以上, 说明 α -葡萄糖苷酶处理对芝麻素酚三糖苷的稳定性无显著性影响。由图 6 看出, β -葡萄糖苷酶作用于芝麻素酚三糖苷分子 (化合物 1), 随着作用时间延长, 芝麻素酚三糖苷特征峰越来越小, 而化合物 2 特征峰却随之增大, 在 24 h 时, 芝麻素酚三糖苷的保存率不足 3.0% (见图 9), 说明芝麻素酚三糖苷对 β -葡萄糖苷酶不稳定。已有研究^{[2][7]32-33}报道, 芝麻素酚三糖苷可被 β -葡萄糖苷酶水解转化为芝麻素酚, 如果同时添加纤维素酶和 β -葡萄糖苷

酶,芝麻木酚素糖苷类化合物水解得到的芝麻素酚更多。本研究中, β -葡萄糖苷酶对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响与现有报道一致。由图 7~9 可以看出,用 α -半乳糖苷酶和 β -半乳糖苷酶分别处理芝麻素酚三糖苷提取物,均能导致芝麻素酚三糖苷分子降解。当酶作用时间为 8 h 时, α -半乳糖苷酶和 β -半乳糖苷酶处理溶液中芝麻素酚三糖苷特征峰变小,并且两种处理溶液均出现 2 个新的特征峰;延长酶作用时间至 24 h,芝麻素酚三糖苷特征峰几乎消失,两种酶液处理后芝麻素酚三糖苷的保存率均小于 5%,可能与 α -半乳糖苷酶和 β -半乳糖苷酶的酶解作用导

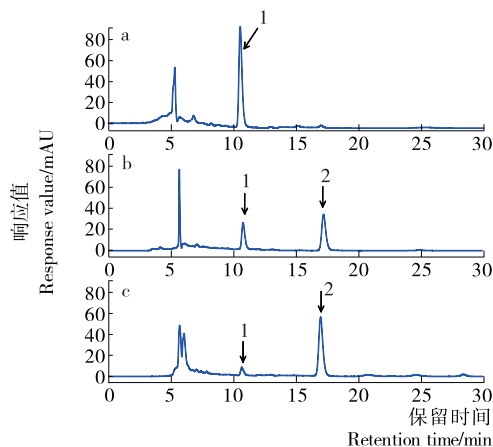


图 6 β -葡萄糖苷酶处理芝麻素酚三糖苷提取物的高效液相色谱图;峰 1 为芝麻素酚三糖苷;峰 2 为新化合物

Figure 6 HPLC chromatograms of sesaminol triglucoside extract with β -glucosidase treatment

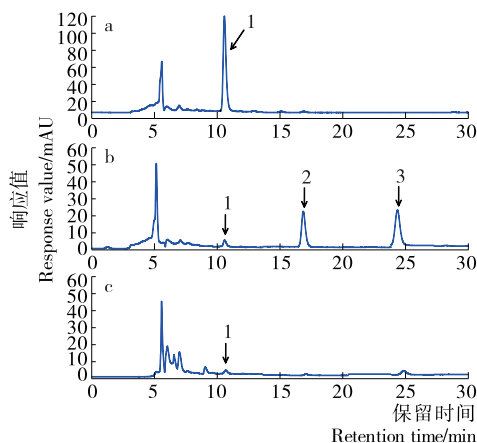


图 7 α -半乳糖苷酶处理芝麻素酚三糖苷提取物的高效液相色谱图;峰 1 为芝麻素酚三糖苷;峰 2 和 3 分别为新化合物

Figure 7 HPLC chromatograms of sesaminol triglucoside extract with α -galactosidase treatment

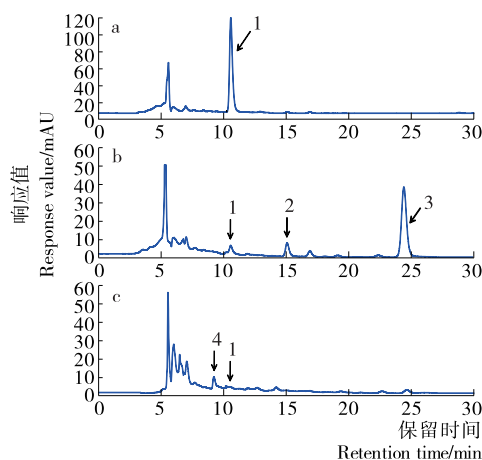


图 8 β -半乳糖苷酶处理芝麻素酚三糖苷提取物的高效液相色谱图;峰 1 为芝麻素酚三糖苷;峰 2、3 和 4 分别为新化合物

Figure 8 HPLC chromatograms of sesaminol triglucoside extract with β -galactosidase treatment

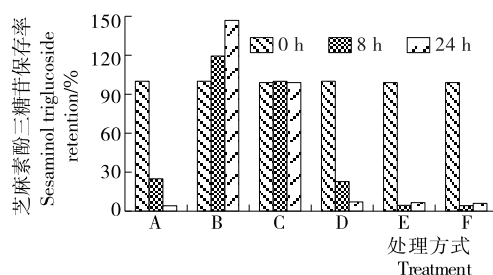


图 9 不同处理条件对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

Figure 9 Effect of different treatment on the stability of sesaminol triglucoside

致芝麻素酚三糖苷分子降解或者转换为其他化合物有关,有待于进一步研究。

2.6 高压蒸汽处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响

将芝麻素酚三糖苷水溶液置于高压蒸汽灭菌锅中,在 121 $^{\circ}\text{C}$ 、 1.01×10^5 Pa 下作用 30 min,芝麻素酚三糖苷的高效液相色谱特征峰及峰面积大小无明显变化,其保存率约 99.96%,说明芝麻素酚三糖苷在高压蒸汽作用下稳定性好。

3 结论

本研究主要探讨光、热、氧(空气)、酸、碱、酶及高温高压处理对芝麻素酚三糖苷稳定性的影响,结果发现,光、热、氧(空气)、碱液(氢氧化钠)、高温高压及 α -葡萄糖苷酶处理对芝麻素酚三糖苷稳定性无显著性影响;盐酸、 β -葡萄糖苷酶、 α -半乳糖苷酶及 β -半乳糖苷酶处理均可导

致芝麻素酚三糖苷分子降解或转化为其他化合物,其稳定性随着作用时间延长显著性降低。

在食品加工过程中,芝麻素酚三糖苷结构稳定性会受到多种因素的影响,本研究虽探讨了单因素作用下芝麻素酚三糖苷的稳定性,但未对于不同因素不同水平及多因素作用下的稳定性及其降解和转化规律进行探讨,这些将在后期研究中深入探讨。

参考文献

- [1] ULYATU F, PUDJI H, TYAS U, et al. The changes of sesaminol triglucoside and antioxidant properties during fermentation of sesame milk by *Lactobacillus plantarum* Dad 13[J]. International Food Research Journal, 2015, 22(5): 1 945-1 952.
- [2] PENG Zhen, XU Ya-yuan, MENG Qing-ran, et al. Preparation of sesaminol from sesaminol triglucoside by β -glucosidase and cellulase hydrolysis[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2016, 93(6): 765-772.
- [3] SUJA Kizhiyedathu-Polachira, JAYALEKSHMY Anathasankaran, ARUMUGHAN Chami. Free radical scavenging behavior of antioxidant compounds of sesame (*Sesamum indicum* L.) in DPPH • system[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(4): 912-915.
- [4] MIYAKE Yoshiaki, FUKUMOTO Syuichi, OKADA Miki, et al. Antioxidative catechol lignans converted from sesamin and sesaminol triglucoside by culturing with *Aspergillus*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(1): 22-27.
- [5] KATSUZAKI Hirotaka, KAWAKISHI Shunro, OSAWA Toshihiko. Sesaminol glucosides in sesame seeds[J]. Phytochemistry, 1994, 35(3): 773-776.
- [6] KANG Myung-Hwa, KAWAI Yoshichika, NAITO Michitaka, et al. Dietary defatted sesame flour decreases susceptibility to oxidative stress in hypercholesterolemic rabbits[J]. The Journal of Nutrition, 1999, 129(10): 1 885-1 890.
- [7] 彭珍. 芝麻粕中芝麻素酚三糖苷的提取及转化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [8] NAIR Arun, KUWAHARA Akika, NAGASE Akihiro, et al. Purification, gene cloning, and biochemical characterization of a β -glucosidase capable of hydrolyzing sesaminol triglucoside from *Paenibacillus* sp. KB0549 [J]. PLOS ONE, 2013, 8(4): e60538.
- [9] ZHU Xiu-ling, ZHANG Xin, SUN Yi, et al. Purification and fermentation in vitro of sesaminol triglucoside from sesame cake by human intestinal microbiota[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(8): 1 868-1 877.
- [10] SHI John, DAI Yu-zhu, KAKUDA Yukio, et al. Effect of heating and exposure to light on the stability of lycopene in tomato purée[J]. Food Control, 2008, 19(5): 514-520.
- [11] 徐春明, 焦志亮, 李丹, 等. 栀子黄色素 β 环糊精包合物制备及其稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 106-113.
- [12] DELAZAR Abbas, KHODAIE Laleh, AFSHAR Jalil, et al. Isolation and free-radical-scavenging properties of cyanidin 3-O-glycosides from the fruits of *Ribes biebersteinii* Berl[J]. Acta Pharmaceutica, 2010, 60(1): 1-11.
- [13] 江乐明, 樊灿梅, 聂少平, 等. 羧甲基化大粒车前子多糖的制备及其生物活性研究[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 10-14.
- [14] 潘宝海, 李德发, 陆文清, 等. 对硝基酚- α -D-吡喃半乳糖法测定饲用 α -半乳糖苷酶(黑曲霉)活力的方法[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(5): 107-111.
- [15] 唐淑芬. β -D-半乳糖苷酶催化合成功能糖的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 18-47.
- [16] WORAWALAI Wisuttaya, KHONGCHAI Phonpimon, SURACHAITANAWAT Nantaporn, et al. Synthesis of furfuran lignans as antidiabetic agents simultaneously achieved by inhibiting α -glucosidase and free radical[J]. Archives of Pharmacal Research, 2016, 39(10): 1 370-1 381.
- [17] XU Tao, YANG Rui-jin, HUA Xiao, et al. Improvement of the yield and flavour quality of sesame oil from aqueous extraction process by moisture conditioning before roasting[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(2): 471-479.
- [18] HUANG Ji-nian, SONG Guo-hui, ZHANG Li-xia, et al. A novel conversion of sesamol to sesaminol by acidic cation exchange resin[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2012, 114(7): 842-848.
- [19] MOAZZAMI Ali-A, HAESE Stefanie-L, KAMAL-ELDIN Afaf. Lignan contents in sesame seeds and products[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2007, 109(10): 1 022-1 027.