

开环异落叶松树脂酚的提取及其 对乳液稳定性的影响研究

程晨, 陈鹏, 王新天, 于坤, 郑畅, 黄庆德, 邓乾春

(中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 农业部油料加工重点实验室, 武汉 430062)

摘要:以含50%开环异落叶松树脂酚二葡萄糖苷(SDG)的亚麻木酚素粗提物(50%SDG)为水解原料,对制备开环异落叶松树脂酚(SECO)粗提物的HCl浓度和水解时间进行优化,进一步通过溶剂萃取、真空冷冻干燥工艺制备SECO粗提物,并将其应用于磷脂-亚麻籽油乳液体系中,研究水解前后亚麻木酚素粗提物对磷脂-亚麻籽油乳液在65℃高温储藏过程中稳定性的影响。结果表明:在HCl浓度1 mol/L、水解时间120 min的条件下水解,可制备SECO含量为65%的SECO粗提物(65%SECO);在磷脂-亚麻籽油乳液高温储藏(65℃)过程中,65%SECO组乳液粒径无显著变化,但对照组和50%SDG组乳液粒径增大;与对照组乳液相比,储藏7 d,65%SECO和50%SDG可分别将乳液中氢过氧化物含量降低11%和27%。由此可见,在磷脂-亚麻籽油乳液的高温储藏(65℃)过程中,50%SDG具有较好的抑制油脂氧化的效果,但通过水解制备的65%SECO能显著提高磷脂-亚麻籽油乳液的物理稳定性。

关键词:亚麻木酚素;开环异落叶松树脂酚二葡萄糖苷;开环异落叶松树脂酚;磷脂-亚麻籽油乳液
中图分类号:TS229;TS202.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2020)01-0091-06

Extraction of secoisolariciresinol and its effect on stability of emulsion

CHENG Chen, CHEN Peng, WANG Xintian, YU Kun,
ZHENG Chang, HUANG Qingde, DENG Qianchun

(Key Laboratory of Oilseeds Processing, Ministry of Agriculture, Hubei Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Science, Wuhan 430062, China)

Abstract: Using flaxseed lignan extracts contained 50% secoisolariciresinol diglucoside (SDG) as hydrolysed raw material, the HCl concentration and hydrolysis time for preparation of secoisolariciresinol (SECO) were optimized, and crude SECO extract was further prepared by solvent extraction and vacuum freeze drying. Then SECO extract was applied to lecithin-linseed oil emulsion system, and the effects of crude flaxseed lignan extracts before and after hydrolysis on the stability of emulsion during the 65℃ storage were studied. The results showed that the crude SECO extract contained 65% SECO (65% SECO) was obtained under the conditions of hydrolysis time 120 min and HCl concentration 1 mol/L. In the emulsion system stored at 65℃, the particle size of the 65% SECO emulsion group didn't change significantly, but that of the control group and the 50% SDG group increased. Compared with the control, 65% SECO and 50% SDG both could reduce the content of hydroperoxide by 11% and 27% after storage

for 7 d. Therefore, 50% SDG had good inhibition effect on oil oxidation, but 65% SECO could significantly improve the physical stability of lecithin-linseed oil emulsion.

Key words: flaxseed lignan; secoisolariciresinol diglucoside; secoisolariciresinol; lecithin-linseed oil emulsion

收稿日期:2019-05-11;修回日期:2019-08-23

基金项目:国家自然科学基金(31771938);国家重点研发计划(2017YFD0400200);现代农业产业技术体系(CARS-17)

作者简介:程晨(1993),女,硕士研究生,研究方向为脂质营养(E-mail)403287090@qq.com。

通信作者:邓乾春,副研究员(E-mail)dengqianchun@caas.cn。

亚麻木酚素是一种以开环异落叶松树脂酚二葡萄糖苷(SDG)为单位结构、具有抗氧化活性的生物大分子,在人体肠道中的菌群作用下经过水解、去羟基化、去甲基化和氧化形成具有预防乳腺癌、结肠癌、前列腺癌等功能的肠二醇(END)和肠内酯(ENL)^[1-5]。亚麻木酚素特殊功能特性主要来源于 END 和 ENL^[6],其生物利用率也主要取决于 SDG 通过转化形成 ENL 和 END 的比例^[7-8]。研究表明,约 57.2% SDG 在人体肠道内能被转化形成 ENL 和 END^[9],但远低于其水解产物开环异落叶松树脂酚(SECO)在人体肠道内的转化率(72%)^[7]。因此,SECO 可能比 SDG 具有更强的对人体健康的干预调理作用。

乳液口服递送体系作为一种经典的脂质载体,可有效提高脂溶性生物活性成分的生物利用率^[10],目前被广泛应用于牛奶、蛋黄酱、蛋白饮料、奶油、冰淇淋等食品体系中。乳液通常为热力学不稳定体系,在储藏过程中易发生絮凝、聚集、奥氏熟化、乳析等现象,严重影响相关产品的外观及口感。此外,由于乳液的粒径较小,增大了油脂与氧气接触的表面积,降低了乳液的氧化稳定性。研究表明,SECO、SDG 是良好的天然抗氧化剂,能有效防止油脂的自动氧化^[11],显著提高乳液体系中油脂的氧化稳定性。在脂质体体系中,弱极性 SECO 在乳液界面处聚集,与磷脂分子发生相互作用,有利于提升体系物理稳定性^[12],但极性 SDG 在储藏过程中,其糖苷基可进入脂质体膜相邻磷脂分子之间的空隙,增大界面膜的间隙,破坏体系的物理稳定性^[13]。综上,考察 SDG 和 SECO 对乳液稳定性的影响具有重要意义。然而目前市售 SDG、SECO 主要通过化学合成法获得,具有产量低、成本高、安全性差等特点,限制了其在食品工业中的研究与应用。因此,本实验通过水解植物性来源的亚麻木酚素制备 SECO,对于获取高纯度的 SECO 提取物、降低生产应用成本和实现产业化应用具有重要参考价值。

本实验选用含 50% SDG 的木酚素粗提物(50% SDG)为原料进行酸水解,以 SECO 含量为指标,对 SECO 的 HCl 浓度和水解时间进行优化,进一步通过有机溶剂萃取、真空冷冻干燥工艺获得 SECO 粗提物,探究水解前后亚麻木酚素粗提物对在高温储藏环境下的磷脂-亚麻籽油乳液稳定性影响,以期为扩大亚麻木酚素的应用领域、推进 PUFAs 相关产品开发提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

50% SDG,购于成都仕凯生物科技有限公司;一级亚

麻籽油,购于红井源油脂有限责任公司;大豆卵磷脂(s-75),购于 Lipoid™ 公司。

盐酸、甲醇、异丙醇、异辛烷、丁醇、三氯化铁、醋酸钠、乙酸、无水乙醚、三氯乙酸、硫氰酸铵、氯化钡、硫酸亚铁,国药化学试剂有限公司;硫代巴比妥酸(TBA),Aladdin 公司;开环异落叶松树脂酚葡萄糖苷(SDG,98%)、开环异落叶松树脂酚(SECO,95%)、过氧化氢异丙苯、1,1,3,3-四乙氧基丙烷(TEP),西格玛奥德里奇上海贸易公司;开环异落叶松树脂酚单葡萄糖苷(SMG,98%)、脱水开环异落叶松树脂酚(98%),上海源叶生物科技有限公司;CH₃COOH、CH₃OH,色谱纯。

1.1.2 仪器与设备

分析天平,恒温水浴摇床,电热恒温箱,台式离心机,IKA 数字高速剪切机,高压微射流均质机,Waters 超高效液相分析仪,DU800 紫外-可见分光光度仪。

1.2 实验方法

1.2.1 亚麻木酚素的酸水解

参照臧茜茜等^[14]的方法进行酸水解亚麻木酚素。取 6 g 50% SDG 于 50 mL 玻璃管中,依次加入 40 mL 不同浓度 HCl 溶液(0.2 ~ 2 mol/L),2 500 r/min 下振荡 30 min 后,将每个浓度样品平均分为 5 份(每份 8 mL)于玻璃管中,置于 95 °C 水浴摇床水解 210 min,在水解期间定时取样。样液在 5 000 r/min 离心 10 min,取上清液过 0.22 μm 滤膜,滤液用超高效液相色谱(UPLC)测定 SDG 和 SECO 含量。

1.2.2 SECO 的萃取

取 10 mL 1.2.1 中水解液(最佳酸水解条件进行该实验)于 50 mL 离心杯中离心,取上清液,加入 30 mL 无水乙醚,在 5 000 r/min 下涡旋 30 min,用分液漏斗收集上层溶液,重复提取 3 次,将获得的萃取液汇总并在 37 °C 下旋蒸至 10 mL,氮吹除去有机溶剂,再于 -80 °C 下预冻 30 min,置于真空冷冻干燥机中干燥,得到 SECO 粗提物。

取 10 mg SECO 粗提物于 100 mL 容量瓶,使用甲醇(色谱法)定容,0.22 μm 滤膜过滤后,用 UPLC 测定 SECO 含量。

1.2.3 SDG 和 SECO 含量的 UPLC 测定

UPLC 条件:流动相 A 为甲醇、B 为 0.5% 乙酸水溶液,进样量 2 μL,在洗脱流速 0.1 mL/min 下进行非线性梯度洗脱(0 ~ 8 min 15% A,8 ~ 12 min 15% A ~ 28% A,12 ~ 16 min 28% A,16 ~ 24 min 28% A ~ 55% A,24 ~ 28 min 55% A ~ 85% A,28 ~ 32 min 85% A,32 ~ 33 min 85% A ~ 15% A,最后以 15% A

保持 2 min), 紫外检测波长 280 nm。采用 SDG、SECO 标准曲线进行定量, 相关系数为 0.999。

1.2.4 磷脂-亚麻籽油乳液的制备及储藏稳定性

以 20% 亚麻籽油为油相, 含 3% 大豆卵磷脂的 5 mmol/L 磷酸缓冲液为水相, 分别加入 50% SDG、SECO 粗提物, 使 SDG/SECO 在整个体系中的浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 。将油水混合物使用高速剪切机在 8 000 r/min 下高速剪切 5 min 获得粗乳液, 使用高压微射流均质机在 82 MPa 的均质压力下循环 4 次, 分别制备对照组、50% SDG 组和 SECO 组磷脂-亚麻籽油乳液。将乳液放置于 65 $^{\circ}\text{C}$ 恒温恒湿箱中避光保存 7 d 并定期取样, 对乳液粒径、氧化产物等指标进行测定, 探究在高温储藏条件下水解前后亚麻木酚素粗提物对乳液稳定性的影响

1.2.5 乳液粒径的测定

使用马尔文纳米粒径分析仪测定在不同储藏时间下磷脂-亚麻籽油乳液的粒径。

1.2.6 初级氧化产物氢过氧化物含量的测定

使用紫外分光光度计对磷脂-亚麻籽油乳液体系中氢过氧化物含量进行测定^[15]。取 0.3 mL 乳液与 1.5 mL 破乳剂(异辛烷-异丙醇, 体积比 3:1) 混合, 涡旋振荡 10 s, 重复 3 次, 每次间隔 20 s, 将混合液在 5 000 r/min 下离心 10 min, 取 200 μL 上层液体于 10 mL 离心管中, 加入 2.8 mL 甲醇-丁醇(体积比 2:1) 混合液, 接着加入 30 μL Fe^{2+} (将 0.132 mol/L BaCl_2 (0.4 mol/L HCl 配制) 与 0.144 mol/L FeSO_4 1:1 混合, 5 000 r/min 下离心 5 min) 和 3.14 mol/L 硫氰酸铵的混合液(体积比 1:1), 振荡均匀, 暗反应 20 min 后在 510 nm 波长下测定吸光度。使用过氧化氢异丙苯制备标准溶液绘制标准曲线。

1.2.7 次级氧化产物丙二醛含量的测定

使用紫外分光光度计对磷脂-亚麻籽油乳液体系中丙二醛的含量进行测定^[16]。在耐高温螺盖玻璃皂化管中将 1 mL 乳液与 2 mL TBA 试剂混合, 振荡均匀, 沸水浴 15 min, 冷却至室温后将反应液在 5 000 r/min 下离心 15 min, 取上清液在 532 nm 波长下测定吸光度。用 1,1,3,3-四乙氧基丙烷配制标准溶液绘制标准曲线。以 TBARS 值表征丙二醛含量。

1.2.8 数据统计分析

采用 Origin 9.1 软件绘制图表, IBM SPSS 24.0 对数据进行 ANOVA 显著性比较分析($p < 0.05$ 时, 具有显著性差异)。所有实验均做 3 个平行, 数据

结果以“平均值 \pm 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 盐酸浓度和水解时间对 SDG 及 SECO 含量的影响

准确称取 6 g 50% SDG 于 50 mL 玻璃管中, 在 HCl 浓度分别为 0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L, 水解时间分别为 100、120、150、180、210 min 的条件下进行水解, 使用 UPLC 对水解产物进行定量分析, 通过与标准品对比分别确定 SDG 和 SECO 的出峰时间, 考察 HCl 浓度和水解时间对 SDG 及 SECO 含量的影响, 结果如图 1 所示。

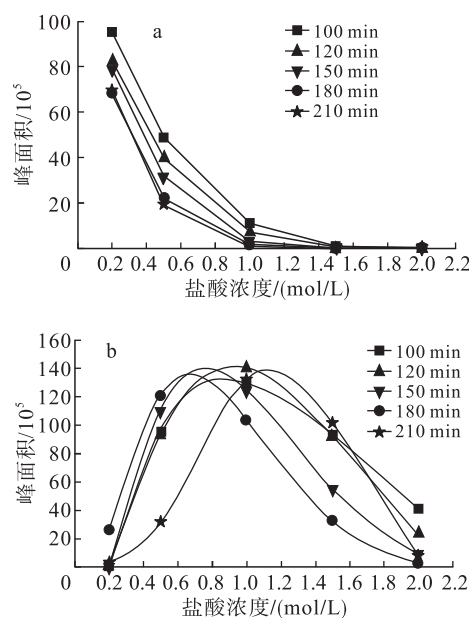
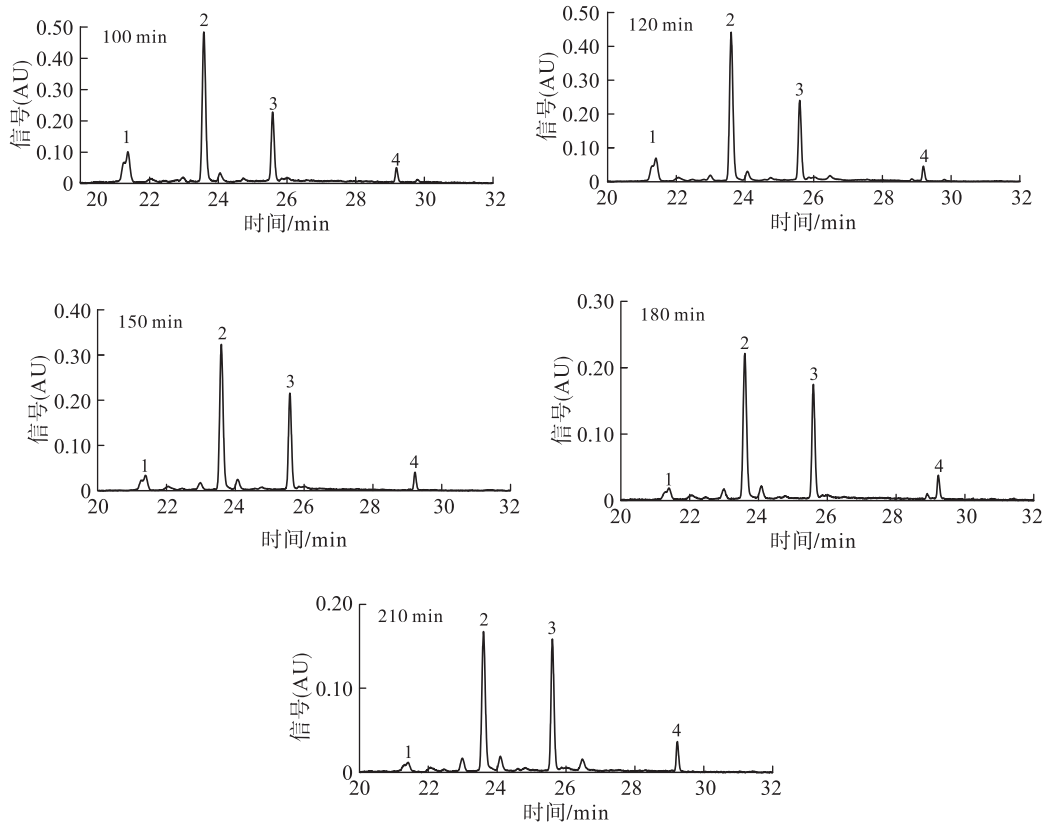


图 1 不同 HCl 浓度和水解时间条件下 SDG (a) 和 SECO (b) 的含量

从图 1 可以看出, 当水解时间相同时, 随着 HCl 浓度的增加, SDG 逐渐被消耗(图 1a), 而 SECO 含量呈先升高后降低的趋势(图 1b)。这是由于当 HCl 浓度低时, 不利于分子间的相互作用, 导致水解速率低; 随着 HCl 浓度增加, 分子间的相互作用加快, 从而提升了水解速率, 因此 SECO 含量增加; 但当 HCl 浓度过高时, SECO 进一步发生水解, 致使 SECO 含量降低。当 HCl 浓度相同时, 随着水解时间的延长, SDG 逐渐被消耗产生 SECO, 但 SECO 含量与水解时间无明显相关性。在水解时间为 120 min 时具有最大的 SECO 含量。综合考虑, 选取水解时间为 120 min、HCl 浓度为 1 mol/L 进行下一步实验。

2.2 亚麻木酚素酸水解产物分析

在 HCl 浓度 1 mol/L 条件下, 考察 50% SDG 水解 100~210 min 内的水解过程, 对其 UPLC 图谱进行分析, 结果如图 2 所示。



注:1. SDG;2. SMG;3. SECO;4. 脱水 SECO。

图2 50%SDG的酸水解产物的UPLC图谱

通过与标准品进行对比,结合参考文献,确定图2中峰1为SDG,峰2为SMG,峰3为SECO,峰4为脱水SECO^[17]。可见,随着水解时间的延长,SDG的峰面积不断减小,SDG转化为SMG的同时SMG向SECO转化,且有少量的脱水SECO产生。因此,可推断,在SDG的酸水解过程中,当HCl浓度为1 mol/L时,SDG水解主要分为3个阶段,且同步进行:第一阶段,SDG分子脱去一分子糖苷生成SMG;第二阶段,SMG脱去一分子糖苷生成苷元化合物SECO;第三阶段,SECO脱去水分子形成脱水SECO。本实验结果与张文斌^[18]研究结果一致,在盐酸浓度为1 mol/L时,SDG主要水解产物为SMG、SECO和脱水SECO。

2.3 粗提物中SECO的含量

采用优化后的水解参数对50%SDG进行水解,取水解后的溶液冷却至室温,使用无水乙醚萃取、真空冷冻干燥制备SECO粗提物,通过UPLC测定粗提物中SECO的含量,其图谱如图3所示。结果表明,粗提物中SECO含量为65%(以下以65%SECO表示)。

2.4 50%SDG和65%SECO对磷脂-亚麻籽油乳液稳定性的影响

按照1.2.4方法使用高压微射流法制备磷脂-

亚麻籽油乳液对照组、65%SECO组和50%SDG组,测得其初始粒径分别为243、260 nm和255 nm。将乳液在65℃下避光储藏7 d,对乳液储藏过程中的粒径、初级氧化产物和次级氧化产物含量进行测定,结果如图4、图5所示。

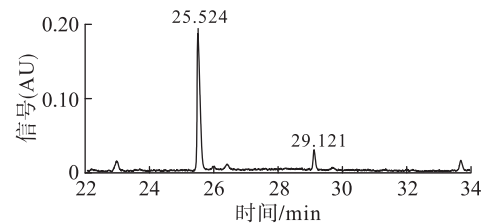


图3 SECO粗提物的UPLC图谱

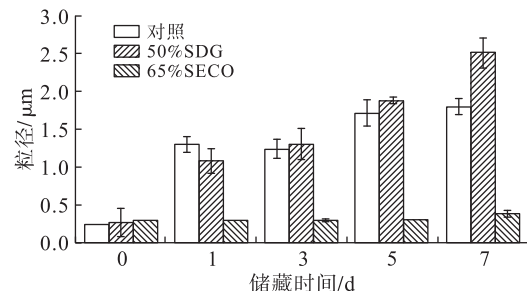


图4 65%SECO和50%SDG对磷脂-亚麻籽油乳液粒径的影响

从图4可以看出,在储藏过程中,对照组乳液和50%SDG组乳液的粒径随着储藏时间的延长而增大,且50%SDG组乳液粒径整体大于对照组。产生

该现象的原因可能是随着储藏时间的延长,SDG 向磷脂界面处移动,其糖苷基插入界面膜内,使磷脂分子间隙增大,加速乳滴相互碰撞,致使乳滴发生絮凝和聚集^[13]。此外,65℃储藏7 d,与对照组相比,65% SECO 组乳液粒径降低了77%,且在整个储藏过程中,65% SECO 组乳液粒径无显著变化($p > 0.05$),表明 SECO 显著提高了磷脂包埋的亚麻籽油的物理稳定性。产生该结果的原因可能为弱极性分子 SECO 主要存在于乳液界面位置,与磷脂分子发生氢键结合^[12],增加了乳液界面厚度,提高乳液稳定性。

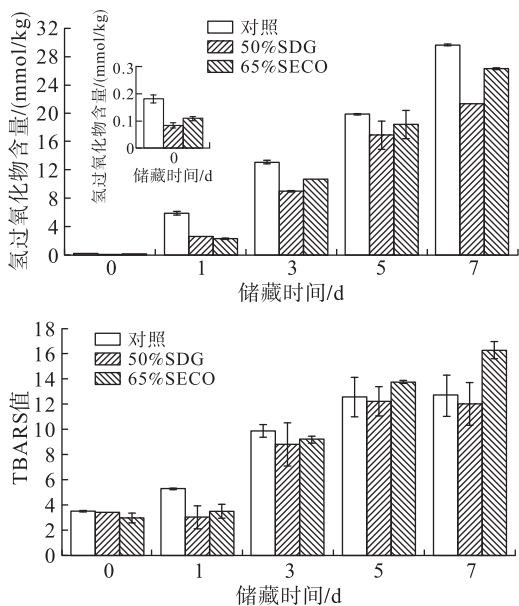


图5 65%SECO和50%SDG对磷脂-亚麻籽油乳液氢过氧化物和TBARS值的影响

从图5可以看出,对照组乳液初始氢过氧化物含量最高,为 (0.181 ± 0.014) mmol/kg,高于含65% SECO和50% SDG的乳液组。说明在乳液制备过程中,65% SECO和50% SDG均具有抑制乳化过程中亚麻籽油氧化的作用。乳液体系中氢过氧化物含量随储藏时间的延长而升高,储藏7 d的对照组乳液中氢过氧化物含量高达 (29.647 ± 0.168) mmol/kg,而65% SECO和50% SDG分别将乳液体系中氢过氧化物含量降低11%和27%。由此可得,在乳液体系中50% SDG具有最佳的抑制亚麻籽油发生初级氧化能力。原因可能为SDG具有较好的热稳定性^[19],因此在65℃高温下,SDG能稳定存在并发挥抗氧化效应。此外,在65% SECO中仍残留少量的 Cl^- (约0.08%),由于盐离子可在液滴表面堆积,改变液滴的表面特性,增加了水相中金属离子等阳离子促氧化成分与油脂的接触,从而加速了油脂氧化^[20-21]。

在乳液储藏前期(0~3 d),50% SDG和65% SECO均具有抑制亚麻籽油氧化产生氢过氧化物的作用。储藏1 d,与对照组乳液相比,分别将乳液氢过氧化物含量降低55%和60%。原因可能是由于亚麻木酚素类多酚化合物在氧化初期能延缓乳液中油脂氧化,降低氢过氧化物等初级氧化产物的含量,但对氢过氧化物进一步裂解产生醛、醇、酮等次级氧化产物含量的过程无直接影响^[16],因此50% SDG组和65% SECO组乳液的TBARS值的变化无显著性差异(储藏1 d,与对照组相比,50% SDG组和65% SECO组乳液TBARS值分别降低了42%和40%)。但储藏7 d,65% SECO组乳液中TBARS值比对照组提高了28%,加速了次级氧化的进程,因为65% SECO中除SECO以外的盐离子、亚麻蛋白等其他物质在高温下长期储藏可能会产生促进氢过氧化物裂解的物质,加速了次级氧化产物的积累,但目前具体机理尚不明确,仍需进一步探究。

3 结论

(1)本实验对水解亚麻木酚素(含50% SDG)提取SECO的条件进行了优化,确定最佳水解条件为HCl浓度1 mol/L、水解时间120 min,此时SECO含量最高。进一步通过无水乙醚萃取,真空冷冻干燥制备了SECO含量为65%的SECO粗提物。通过对水解产物UPLC图谱分析发现,当盐酸浓度为1 mol/L时,SDG首先脱去一分子糖苷生成SMG,SMG进一步水解失去一分子糖苷生成SECO,SECO在酸的作用下失去一分子水,形成脱水SECO,且以上水解过程同时进行。

(2)磷脂-亚麻籽油乳液的储藏稳定性实验表明,50% SDG和水解产物65% SECO均具有抑制乳化过程中亚麻籽油氧化的作用。65℃储藏7 d,与对照组相比,65% SECO组乳液粒径降低了77%,因此65% SECO抑制了乳液在高温储藏过程中的聚集、絮凝现象的发生,显著提高了乳液的物理稳定性;储藏1 d,50% SDG和65% SECO分别可将乳液体系中氢过氧化物含量降低55%和60%,TBARS值降低42%和40%。但储藏7 d,65% SECO组TBARS值比对照组提高了28%,加速了次级氧化的进程,其具体原理还需进一步探究。

参考文献:

- [1] TOURE A, XU X M. Flaxseed lignans: source, biosynthesis, metabolism, antioxidant activity, bio-active components, and health benefits[J]. Compr Rev Food Sci Food Safe, 2010, 9(3):261-269.
- [2] 田光晶, 马丛丛, 许继取. 亚麻木酚素对动脉粥样硬化

- 的改善作用研究进展[J]. 中国油脂, 2017, 42(1): 35-39.
- [3] XIE L H, AKAO T, HAMASAKI K, et al. Biotransformation of pinosresinol diglucoside to mammalian lignans by human intestinal microflora, and isolation of *Enterococcus faecalis* strain PDG-1 responsible for the transformation of (+)-pinosresinol to (+)-lariciresinol[J]. Chem Pharm Bull, 2003, 51(5):508-515.
- [4] MUNOZ O, FUENTEALBA C, AMPUERO D, et al. Effect of *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* on the in vitro bioaccessibility of flaxseed lignans (*Linum usitatissimum* L.)[J]. Food Funct, 2018, 9(4):2426-2432.
- [5] KUIJSTEN A, ARTS I C W, HOLLMAN P C H, et al. Plasma enterolignans are associated with lower colorectal adenoma risk[J]. Cancer Epidem Prevent Biomark, 2006, 15(6): 1132-1136.
- [6] LANDETE J M. Plant and mammalian lignans: a review of source, intake, metabolism, intestinal bacteria and health[J]. Food Res Int, 2012, 46(1):410-424.
- [7] EECKHAUT E, STRUIJS K, POSSEMIERS S, et al. Metabolism of the lignan macromolecule into enterolignans in the gastrointestinal lumen as determined in the simulator of the human intestinal microbial ecosystem[J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(12):4806-4812.
- [8] HEINONEN S, NURMI T, LIUKKONEN K, et al. In vitro metabolism of plant lignans: new precursors of mammalian lignans enterolactone and enterodiol[J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(7):3178-3186.
- [9] LIU Z, SAARINEN N M, THOMPSON L U. Sesamin is one of the major precursors of mammalian lignans in sesame seed (*Sesamum indicum*) as observed in vitro and in rats[J]. J Nutr, 2006, 136(4):906-912.
- [10] 张贝贝, 田少君. 亚麻籽油纳米脂质体的制备及体外释放性能研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(9):49-54.
- [11] HOSSEINIAN F S, MUIR A D, WESTCOTT N D. Antioxidant capacity of flaxseed lignans in two model systems[J]. J Am Oil Chem Soc, 2006, 83(10):835-840.
- [12] SOCRIER L, QUÉRO A, VERDU M, et al. Flax phenolic compounds as inhibitors of lipid oxidation: elucidation of their mechanisms of action[J]. Food Chem, 2018, 274: 651-658.
- [13] PHAN H T T, YODA T, CHAHAL B, et al. Structure-dependent interactions of polyphenols with a biomimetic membrane system[J]. Biochim Biophys Acta (BBA) - Biomembr, 2014, 1838(10):2670-2677.
- [14] 臧茜茜, 魏晓珊, 陈鹏, 等. 不同品种亚麻籽木酚素多聚体水解物的组成及含量[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(2):253-259.
- [15] KIRALAN S S, DOGU-BAYKUT E, KITTIPONGPIT-TAYA K, et al. Increased antioxidant efficacy of tocopherols by surfactant solubilization in oil-in-water emulsions[J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(43): 10561-10566.
- [16] CHEN F, LIANG L, ZHANG Z P, et al. Inhibition of lipid oxidation in nanoemulsions and filled microgels fortified with ω -3 fatty acids using casein as a natural antioxidant[J]. Food Hydrocolloid, 2017, 63:240-248.
- [17] LI X, YUAN J P, XU S P, et al. Separation and determination of secoisolariciresinol diglucoside oligomers and their hydrolysates in the flaxseed extract by high-performance liquid chromatography[J]. J Chromatogr A, 2008, 1185(2):223-232.
- [18] 张文斌. 亚麻木酚素的提取纯化与生物活性研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2007.
- [19] 金鑫, 阎卫东, 邵云东. 食品加工方法对亚麻木酚素稳定性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 134-137.
- [20] CUI L, FAN J, SUN Y F, et al. The prooxidant activity of salts on the lipid oxidation of lecithin-stabilized oil-in-water emulsions[J]. Food Chem, 2018, 252:28-32.
- [21] KANNER J, HAREL S, JAFFE R. Lipid peroxidation of muscle food as affected by sodium chloride[J]. J Agric Food Chem, 1991, 39(6):1017-1021.

欢迎订阅2020年度《中国油脂》

欢迎关注中国油脂微信公众号

扫一扫

