

负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液 体外抗氧化性及消化性

李 杨, 刘丽美, 唐志国, 马丽媛, 刘东琦, 张雨迪

(绥化学院 食品与制药工程学院, 黑龙江 绥化 152061)

摘要:为解决含甘油解猪油的食物在贮藏过程中易被氧化的问题,向甘油解猪油中加入二氢槲皮素,制备负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液,通过体外模型测定该微乳液的还原力以及对DPPH、ABTS和羟自由基的清除能力,探讨含二氢槲皮素甘油解猪油微乳液的体外抗氧化性,同时通过体外模拟胃肠消化测定其消化性。结果表明:该微乳液具有一定的还原力及DPPH、ABTS、羟自由基的清除能力,且还原力及自由基清除能力均随着二氢槲皮素负载量的增加而升高,相关性显著;该微乳液经胃消化2 h后二氢槲皮素的保留率为79.25%,说明该微乳液能有效保护二氢槲皮素实现靶向性肠道输送,在肠道消化2 h后,微乳液的游离脂肪酸释放率达到73.85%,二氢槲皮素生物利用率达33.3%。综上,负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液在食品工业中有较大的应用潜力。

关键词:二氢槲皮素;甘油解猪油;微乳液;抗氧化性;生物利用率

中图分类号:TS225.2;TS251.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2022)05-0100-06

Antioxidant activity and digestibility in vitro of glycerolized lard microemulsion loaded with dihydroquercetin

LI Yang, LIU Limei, TANG Zhiguo, MA Liyuan, LIU Dongqi, ZHANG Yudi

(College of Food and Pharmaceutical Engineering, Suihua College, Suihua 152061, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to solve the problem of the food containing glycerolized lard easy to be oxidized, dihydroquercetin was added to glycerolized lard to prepare glycerolized lard microemulsion. The in vitro model was used to determine the reducing power of the microemulsions and scavenging ability on DPPH, ABTS and hydroxyl radicals so as to investigate the in vitro antioxidant properties of the glycerolized lard microemulsions, the digestibility of the microemulsions was also determined by simulating gastrointestinal digestion in vitro. The results showed that the microemulsions had certain reducing power and scavenging ability on DPPH, ABTS and hydroxyl radicals, and the reducing power and scavenging ability of free radicals increased with the increase of dihydroquercetin loading amount, and the correlation was significant. In vitro digestion study revealed that the retention rate of dihydroquercetin was 79.25% after 2 h of gastric digestion, which indicated that the microemulsion could effectively protect dihydroquercetin against gastric digestion, and targetedly delivered to the small intestine. After 2 h of intestinal digestion, the free fatty acid release rate of microemulsion was 73.85% and the bioavailability of dihydroquercetin reached 33.3%. Therefore, glycerolized lard microemulsion loaded with dihydroquercetin could have huge application potential in food industry.

Key words: dihydroquercetin; glycerolized lard; microemulsion; antioxidant activity; bioavailability

收稿日期:2021-08-06;修回日期:2022-01-26

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LH2019C069)

作者简介:李 杨(1985),女,讲师,硕士,研究方向为农产品加工及贮藏(E-mail)liyong_850102@126.com。

二氢槲皮素又称花旗松素、黄杉素,存在于多种植物中,尤其在落叶松中含量很高^[1-2],是一类拥有活泼的羟基氢的黄酮类化合物^[3],具有抗氧化、抗

癌、抗病毒、抗炎等功能特性^[4-5]。近年来,二氢槲皮素在葡萄、橘子和西柚中也有发现,现已被广泛关注和研究,然而二氢槲皮素不溶于油脂,限制了其在含油脂类食品中的应用。

甘油解猪油是由猪油通过甘油解反应制得,主要成分为甘油二酯(diacylglycerol, DAG),其具有亲水亲油性,而且食用后在人和动物体内不蓄积,可以起到抑制体重增加、降血脂、减少内脏脂肪积累等功效^[6-7],是很好的脂肪替代物,然而由于甘油解猪油在常温下呈固态,不利于生产加工,且在贮藏过程中易被氧化,因此其应用受到限制。

微乳液是一种由油、水、表面活性剂及助表面活性剂组成的热力学上稳定的溶液体系^[8],其能有效地运载功能营养成分。Aditya等^[9]用双重乳液运载姜黄素和儿茶素,提高了其在胃肠消化过程中的生物利用率;李朝阳等^[10]研究发现以中链甘油三酯为油相载体包埋槲皮素的纳米乳液能有效提高槲皮素的生物保留率。甘油解猪油脂肪酸组成与猪油相似^[11],以其作为微乳液运载二氢槲皮素的研究鲜有报道。

本试验以甘油解猪油为油相,将二氢槲皮素包埋于微乳液中,制备负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液,通过体外抗氧化及消化模型测定负载二氢槲皮素微乳液的还原力以及对DPPH、ABTS和羟自由基的清除能力,系统探讨负载二氢槲皮素微乳液的体外抗氧化性和消化性。该研究不仅可以加强二氢槲皮素在含油脂类食品中的应用,同时还能够解决含甘油解猪油的食物在贮藏过程中易被氧化的问题,为二氢槲皮素在具有功能特性的甘油解猪油中的应用及开发该类功能性肉制品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

甘油解猪油(DAG含量47.92%),实验室自制;二氢槲皮素,西安拓丰生物有限公司;1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH),美国Sigma公司;2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)(ABTS),湖南汇百特生物科技有限公司;其他试剂均为国产分析纯。

UT-1800型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;GL-21M型高速冷冻离心机,湖南湘仪实验仪器开发有限公司;XK96-B型旋涡振荡器,江苏新康医疗器械有限公司;T18 basic型高速匀浆机,德国IKA公司;SRH60-70高压均质机,上海申鹿均质机有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 负载二氢槲皮素甘油解猪油微乳液的制备

称取一定量甘油解猪油于烧杯内,按质量比1:1加入吐温-80混匀后,再以质量比6:4加入丙三醇,用磁力搅拌器进行搅拌同时将温度调至60℃,逐滴加入一定浓度的二氢槲皮素溶液,并用高速匀浆机以10 000 r/min的速度分散3 min,用高压均质机(100 MPa)均质,得到负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液。按上述方法制备二氢槲皮素负载量分别为20、40、60、80、100 μg/mL的微乳液。

1.2.2 甘油解猪油微乳液体外抗氧化性测定

1.2.2.1 还原力的测定

分别将1.0 mL不同二氢槲皮素负载量的微乳液与2.5 mL 0.2 mol/L的磷酸盐缓冲液(pH 6.6)和2.5 mL 1%铁氰化钾混合,50℃保温20 min,快速冷却,然后加入2.5 mL质量浓度为100 g/L的三氯乙酸溶液(TCA),充分混匀,于3 000 r/min下离心10 min,取上清液5 mL,加入5 mL蒸馏水和1 mL 0.1%的氯化铁溶液,充分混匀后放置10 min,于700 nm处测定吸光度^[12]。以吸光度的高低反映样品还原力的强弱^[13]。

1.2.2.2 对DPPH自由基清除能力的测定

分别将2.0 mL不同二氢槲皮素负载量的微乳液与2.0 mL 0.2 mmol/L DPPH无水乙醇溶液混合后暗处放置30 min,用无水乙醇做参比,测定反应体系在517 nm处的吸光度(A_i);同时测定2 mL DPPH溶液与2 mL无水乙醇的混合液的吸光度(A_c)及2 mL试样液与2 mL无水乙醇混合液的吸光度(A_k),按下式计算DPPH自由基清除率(x)^[14]。

$$x = [1 - (A_i - A_k) / A_c] \times 100\% \quad (1)$$

1.2.2.3 对ABTS自由基清除能力的测定

将7 mmol/L的ABTS溶液与2.45 mmol/L的过硫酸钾溶液混合,室温避光存放12~16 h,用pH 4.5的乙酸钠溶液(20 mmol/L)稀释至在波长734 nm处的吸光度为 0.70 ± 0.02 ,得工作液。取3 mL工作液与20 μL不同二氢槲皮素负载量的微乳液混合,放置6 min,于734 nm处测定吸光度(A_s),用乙酸钠溶液替代样品,于734 nm处测定吸光度(A_c),按下式计算ABTS自由基清除率(Y)^[15]。

$$Y = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.2.4 对羟自由基清除能力的测定

分别取2 mL不同二氢槲皮素负载量的微乳液,加入0.5 mL 6 mmol/L FeSO_4 、2 mL 1.5 mmol/L水

杨酸-乙醇溶液,再加入 0.5 mL 0.1% 的 H_2O_2 溶液,于 37 °C 下反应 15 min 后在 510 nm 下测各反应体系中的吸光度(A_x);以蒸馏水代替双氧水测定吸光度(A_{x0})及以蒸馏水代替试样液测定吸光度(A_0),按下式计算羟自由基清除率(Y_1)^[16]。

$$Y_1 = [1 - (A_x - A_{x0})/A_0] \times 100\% \quad (3)$$

1.2.3 甘油解猪油微乳液体外模拟消化

体外模拟消化参照 Diao 等^[17]的方法,并作如下修改:

模拟胃消化:将 2 g NaCl 溶于 7 mL 1 mol/L 的盐酸中,用去离子水定容至 1 000 mL,再用 1 mol/L HCl 调节 pH 至 2.0 得模拟胃液。将 20 mL 二氢槲皮素负载量为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的微乳液样品与等体积的模拟胃液混合后,加入胃蛋白酶,使其终质量浓度为 3.2 mg/mL,随后置于 37 °C 水浴中电动搅拌(150 r/min)反应 2 h,然后迅速于沸水浴中灭酶 15 min,终止胃消化。

模拟肠消化:将胃消化液用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 7.5,加入等体积的模拟肠液(10 mmol/L $CaCl_2$ 、10 mg/mL 猪胆盐和 3.2 mg/mL 胰脂酶溶于磷酸盐缓冲液中,调节 pH 至 7.5),混合均匀后,置于 37 °C 水浴中消化 2 h。消化过程中,不断滴加 NaOH 以维持混合液的 pH 为 7.5。

消化结束后,取 20 mL 消化液,以 10 000 r/min 离心 45 min,收集中间的胶束相。

1.2.4 游离脂肪酸释放率的测定

利用 pH-stat 全自动电位滴定仪测定体外模拟肠消化过程中维持体系 pH 为 7.5 所消耗的 NaOH 的量,计算游离脂肪酸的释放率(x),计算公式如下。

$$x = \frac{C_0 \times V_t \times 10^{-3} \times M}{m \times 3} \times 100\% \quad (4)$$

式中: C_0 为 NaOH 的浓度,0.01 mol/L; V_t 为 t min 消耗 0.01 mol/L NaOH 溶液的总量,mL; M 为甘油解猪油的平均摩尔质量,g/mol; m 为加入甘油解猪油的质量,g。

1.2.5 二氢槲皮素保留率的测定

准确称取 50 mg 干燥至恒重的二氢槲皮素对照品溶于乙醇中,制备成 0.5 mg/mL 的对照品储备液。分别移取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 储备液于 25 mL 容量瓶中,加入乙醇溶液,使总体积达到 3 mL,再用水定容,在 288 nm 处测定其吸光度。以吸光度(y)对二氢槲皮素质量浓度(x ,mg/mL)绘制标准曲线,得标准曲线方程: $y = 2.9526x + 2.1349$ 。

分别取胃、肠消化结束后的消化液 1 mL 于

25 mL 容量瓶中,加入乙醇使总体积为 3 mL,再用水定容,于 288 nm 处测定吸光度,代入标准曲线方程,计算二氢槲皮素的含量,以消化液中二氢槲皮素的含量占消化液中二氢槲皮素初始含量的比例计算二氢槲皮素的保留率^[18]。

1.2.6 二氢槲皮素生物利用率的计算

取 1.2.3 中胶束相,按 1.2.5 方法测定二氢槲皮素含量,按式(5)计算二氢槲皮素的生物利用率(x)。

$$x = C_1/C_0 \times 100\% \quad (5)$$

式中: C_1 为胶束中二氢槲皮素的含量; C_0 为消化液中二氢槲皮素的初始含量。

1.2.7 统计分析

每个试验重复 3 次,结果用“均值 \pm 标准偏差”表示。采用 Statistix 8.1 软件进行数据之间的差异显著性($P < 0.05$)分析,采用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液的体外抗氧化性能

2.1.1 还原力

不同二氢槲皮素负载量的微乳液还原力见图 1。

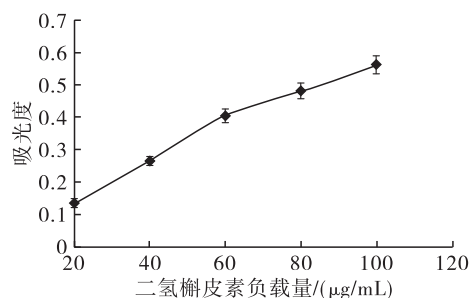


图 1 不同二氢槲皮素负载量的微乳液还原力

从图 1 可看出,随着二氢槲皮素负载量的增加,微乳液还原力呈上升趋势,说明微乳液包埋的二氢槲皮素能将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,起到抗氧化作用。

2.1.2 对 DPPH 自由基的清除能力

不同二氢槲皮素负载量的微乳液 DPPH 自由基清除能力见图 2。

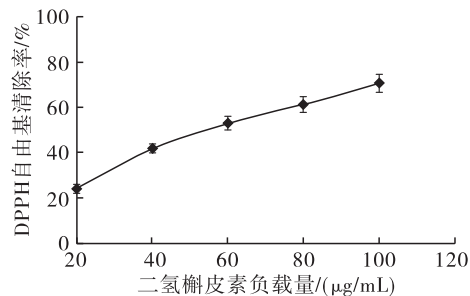


图 2 不同二氢槲皮素负载量的微乳液 DPPH 自由基清除能力

从图2可看出,不同二氢槲皮素负载量的微乳液对DPPH自由基均有一定的清除能力,且随着二氢槲皮素负载量的增加而增强,说明微乳液包埋的二氢槲皮素对DPPH自由基有一定的清除效果,这可能与二氢槲皮素中的酚羟基数目有关^[13]。

2.1.3 对ABTS自由基的清除能力

不同二氢槲皮素负载量的微乳液ABTS自由基清除能力见图3。

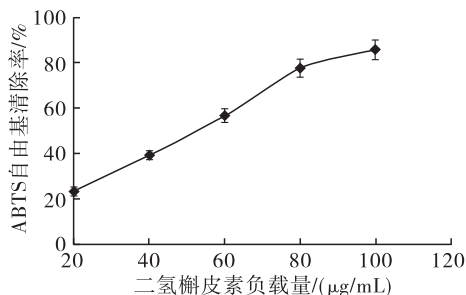


图3 不同二氢槲皮素负载量的微乳液ABTS自由基清除能力

从图3可看出,微乳液对ABTS自由基的清除能力与对DPPH自由基的清除能力相似,也随着二氢槲皮素负载量的增加而增强。二氢槲皮素属酚类化合物,其抗氧化性除了与取代基的供电子效应有关外,还与酚羟基周围空间位阻有关^[19]。

2.1.4 对羟自由基的清除能力

羟自由基是一种活性氧,在体内能杀死红细胞,破坏细胞膜,使DNA和多糖化合物发生降解,摄入羟自由基清除剂能显著降低羟自由基在体内的危害。不同二氢槲皮素负载量的微乳液羟自由基清除能力见图4。

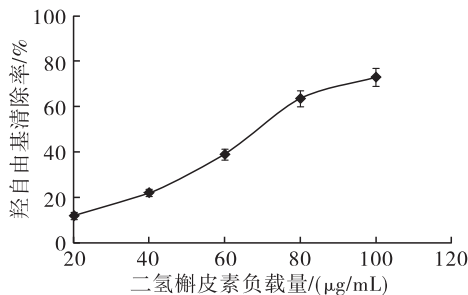


图4 不同二氢槲皮素负载量的微乳液羟自由基清除能力

从图4可看出,当二氢槲皮素负载量为20 $\mu\text{g/mL}$ 时,羟自由基清除率为12.1%,随着二氢槲皮素负载量增至100 $\mu\text{g/mL}$ 时,羟自由基清除率增至72.8%,说明微乳液中加入的二氢槲皮素具有一定的清除羟自由基的能力。

2.1.5 相关性分析

将微乳液中二氢槲皮素的负载量与微乳液抗氧化能力进行相关性分析,结果见表1。从表1可看

出,微乳液表现出的抗氧化能力与二氢槲皮素负载量呈极显著正相关。刘慧敏^[20]报道植物油中的多酚含量与氧自由基吸收能力、ABTS自由基清除能力均呈显著正相关,向卓亚等^[21]也提出在藜麦体外模拟消化过程中总黄酮含量与其抗氧化活性呈正相关,这些均说明本研究的二氢槲皮素的酚羟基能够猝灭自由基,终止自由基的链式反应,且负载量越多其抗氧化效果越好。

表1 二氢槲皮素负载量与微乳液抗氧化能力相关性分析

还原力	羟自由基清除率	DPPH自由基清除率	ABTS自由基清除率
0.990 **	0.989 **	0.988 **	0.993 **

注:**代表相关性极显著($P < 0.01$)。

2.2 负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液的消化性能

2.2.1 消化过程中游离脂肪酸释放率(见图5)

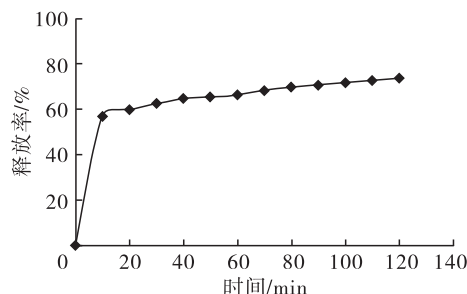
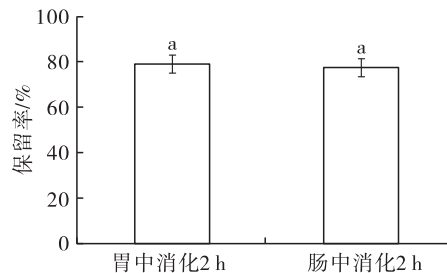


图5 微乳液消化过程中游离脂肪酸的释放率

从图5可看出,微乳液的游离脂肪酸释放率先快速增加后缓慢提高的趋势,微乳液在胃部消化时表层被酶解,当微乳液从胃液转移至肠液时,一方面快速分散,另一方面由于微乳液粒径小,比表面积大,与肠液中脂肪酶接触面增大,利于油相水解,因此消化前期表现出更大的游离脂肪酸释放率增长率。消化2 h,消化基本完全,达到最大的游离脂肪酸释放率(73.85%)。

2.2.2 消化后二氢槲皮素的保留率(见图6)



注:相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。

图6 体外模拟消化后二氢槲皮素的保留率

从图6可以看出,胃部消化2 h后二氢槲皮素的保留率为79.25%,绝大部分的二氢槲皮素仍保留在微乳液中,说明该微乳液能有效保护二氢槲皮

素实现靶向性肠道输送,并在模拟肠道消化过程中被释放,这可能是因为胰脂酶水解了微乳液的油层,但二氢槲皮素并没有发生降解,因此其肠道消化后的保留率与胃部消化后的保留率差异不显著($P > 0.05$)。Flores 等^[22]在对乳清蛋白为壁材包埋酚类物质的微胶囊体外消化的研究中也发现了类似的现象。Ydjedd 等^[23]研究表明,在肠道消化过程中最高剂量的酚类物质和类黄酮物质从微胶囊中释放出来,这一结果与本研究的一致。

2.2.3 消化后二氢槲皮素的生物利用率

模拟胃肠消化后,胃液消化过程中较低的 pH 降低了分子间的作用力,促进了二氢槲皮素的释放并在肠消化 2 h 后基本结束^[24],并且在脂质消化过程中产生的游离脂肪酸可以形成胶束,二氢槲皮素可能主要通过这些脂肪酸胶束的增溶进而被机体吸收利用,可作为营养物质递送系统。按 1.2.6 方法计算得到二氢槲皮素的生物利用率为 33.3%。说明经消化后二氢槲皮素具有较高的生物利用率。

3 结论

通过还原力以及 DPPH、ABTS 和羟自由基清除能力的测定,分析了负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液的体外抗氧化能力,结果显示,负载二氢槲皮素微乳液的还原力及对 DPPH、ABTS 和羟自由基的清除能力均随着二氢槲皮素负载量的增加而升高,且相关性显著,说明该微乳液具有较好的抗氧化活性。在体外模拟消化过程中,胃液能有效保护二氢槲皮素,实现靶向性肠道输送,且随着消化时间的延长,该微乳液具有较高的游离脂肪酸释放率和二氢槲皮素生物利用率,因此甘油解猪油作为载体负载二氢槲皮素可以得到具有较高抗氧化能力的微乳液体系,且具有一定的生物利用率。负载二氢槲皮素的甘油解猪油微乳液在食品工业中有较大的应用潜力。

参考文献:

[1] WANG Y H, WANG W Y, LIAO J F, et al. Prevention of macrophage adhesion molecule - 1 (Mac1) - dependent neutrophil firm adhesion by taxifolin through impairment of protein kinase - dependent NADPH oxidase activation and antagonism of G protein - mediated calcium influx [J]. *Biochem Pharmacol*, 2004, 67(12): 2251 - 2262.

[2] 王佳奇,宋明铭,陈凯,等. 响应面法优化落叶松中二氢槲皮素纯化工艺 [J]. *食品科学*, 2016, 37(4): 20 - 24.

[3] 冉丹,吴海智,卢超,等. HPLC 法测定乳制品中二氢槲皮素含量 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 279 - 284.

[4] HARAGUCHI H, MOCHIDA Y, SAKAI S, et al. Protection against oxidative damage by dihydroflavonols in

Engelhardtia chrysolepis [J]. *Biosci Biotech Biochem*, 1996, 60(6): 945 - 948.

[5] KOLHIR V K, BYKOV V A, BAGINSKAJA A I, et al. Antioxidant activity of a dihydroquercetin isolated from *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. wood [J]. *Phytother Res*, 1996, 10(6): 478 - 482.

[6] TADA N, YOSHIDA H. Diacylglycerol on lipid metabolism [J]. *Curr Opin Lipidol*, 2003, 14(1): 29 - 33.

[7] FLICKINGER B D, MATSUO N. Nutritional characteristics of DAG oil [J]. *Lipids*, 2003, 38(2): 129 - 132.

[8] MARTÍNEZ - MARTÍNEZ F, GUTIÉRREZ - BECERRA A, CASILLAS N, et al. Characterization of reverse microemulsion formed with functionalized surfactants based on ferricyanide ions [J]. *Colloids Surf A*, 2018, 541: 10 - 16.

[9] ADITYA N P, MACEDO A S, DOKTOROVOVA S, et al. Development and evaluation of lipid nanocarriers for quercetin delivery: a comparative study of solid lipid nanoparticles (SLN), nanostructured lipid carriers (NLC), and lipid nanoemulsions (LNE) [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2014, 59(1): 115 - 121.

[10] 李朝阳,窦中友,张丽萍,等. 载体油对槲皮素纳米乳液理化稳定性和生物利用度的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42(12): 85 - 90.

[11] DIAO X Q, GUAN H N, ZHAO X X, et al. Properties and oxidative stability of emulsions prepared with myofibrillar protein and lard diacylglycerols [J]. *Meat Sci*, 2016, 115: 16 - 23.

[12] APÁTI P, SZENTMIHÁLYI K, KRISTÓ S T, et al. Herbal remedies of solidago - correlation of phytochemical characteristics and antioxidant properties [J]. *J Pharmaceut Biomed Anal*, 2003, 32(4/5): 1045 - 1053.

[13] 郝晓丽,许申鸿,杭瑚. TBHQ 与 V_E 抗氧化协同作用的研究 [J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2003(3): 53 - 55.

[14] WANG B N, LIU H F, ZHENG J B, et al. Distribution of phenolic acids in different tissues of jujube and their antioxidant activity [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(4): 1288 - 1292.

[15] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. *Free Radical Biol Med*, 1999, 26(9): 1231 - 1237.

[16] 周向军,高义霞,袁毅君,等. 乌龙茶多糖提取工艺及抗氧化作用研究 [J]. *中国酿造*, 2011, 30(8): 80 - 84.

[17] DIAO X Q, GUAN H N, KONG B H, et al. In vitro digestion of emulsified lard - based diacylglycerols [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101: 3386 - 3393.

度、内部挡料板长度与位置对关键机构内部流场的影响规律,结果表明分离腔厚度对壳仁分离腔流场分布影响较为明显,沉降箱挡料板长度和位置对核桃壳能否快速流向出壳口有较大影响。壳仁分离机构优选方案为分离腔厚度 90 mm、长度 1 200 mm、进料口下部分离腔长度 300 mm,沉降箱宽度 450 mm、2 个平行于沉降箱下部对应斜侧板的长挡料板长度满足末端折弯外侧面与出壳口左右两侧邻近壁面同面、壳入口处挡料板位置贴近沉降箱壳入口。对组装后的壳仁分离系统进行流场模拟分析表明,该系统适宜各等级核桃壳仁的分离。对照团队研制定型的核桃破壳、壳仁分离加工成套设备配套的分离系统表明,采用流场仿真分析的方法对于缩短壳仁气流分离系统研发周期、降低设备制作成本具有重要的实际意义,也可为现有设备的持续改进以及新型设备的研发提供依据。

参考文献:

- [1] 缪福俊,耿树香,肖良俊,等. 核桃油生物活性研究进展[J]. 中国油脂,2021,46(6):85-88.
- [2] 严茂林,张洋,吴成亮. 我国木本油料发展现状分析与供需问题的研究[J]. 中国油脂,2021,46(4):1-6.
- [3] 曹成茂,蒋兰,吴崇友,等. 山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(10):307-315.
- [4] 李忠新,刘奎,杨莉玲,等. 锥篮式核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(S1):146-152.
- [5] 刘明政,李长河,张彦彬,等. 柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):266-273.
- [6] 朱占江,李忠新,杨莉玲,等. 核桃壳仁分离技术研究进展[J]. 食品工业,2014,35(2):216-219.
- [7] NAHAL A M, ARABHOSSEINI A, KIANMEHR M H. Separation of shelled walnut particles using pneumatic method[J]. Int J Agric Biol Eng, 2013,6(3):88-93.
- [8] 罗坤. 山核桃壳仁风选机设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2020.
- [9] 朱占江,刘奎,刘佳,等. 核桃壳仁气流分离装置分离腔流场均匀性比较研究[J]. 新疆农机化,2018(5):25-26,29.
- [10] 牛浩. 核桃壳仁分离装置设计及试验研究[D]. 新疆阿拉尔:塔里木大学,2020.
- [11] 王维,贺功民,王亚妮,等. 核桃破壳取仁生产线的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(4):100-103.
- [12] 董远德,张学军,史建新. 核桃壳仁风选机的设计与试验研究[J]. 农业机械,2012,24(16):156-158.
- [13] 刘奎. 核桃工厂化破壳加工工艺与生产线设计研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [14] 朱占江,康敏,刘奎,等. 核桃壳仁混合物料气流分离系统的试验研究[J]. 中国油脂,2022,47(3):137-142.
- [15] 马秋成,卢安舸,高连兴,等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):297-303.
- [16] 高连兴,李献奇,关萌,等. 双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(3):110-117.
- [17] 宋炫璋. 桃核壳仁分选机设计及试验研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.
- [18] 常栋科,武文斌,原富林,等. 垂直吸风道风选器的仿真分析及研究[J]. 粮食与饲料工业,2015(5):9-13.
- [19] 栗晓宇,杜岳峰,牛兴成,等. 玉米清选装置结构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(S2):233-242.
- [20] INNOCENTINI M, BARIZAN W S, ALVES M, et al. Pneumatic separation of hulls and meats from cracked soybeans [J]. Food Bioprod Process, 2009, 87(4):237-246.
- [21] 阮竟兰,武文斌. 粮食机械原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2017:113-114.
- [22] 刘四麟. 粮食工程设计手册[M]. 郑州:郑州大学出版社,2002:986-989.
- [23] 马云海,张金波,吴亚丽. 农业物料学[M]. 北京:化学工业出版社,2015:80-81.
- [18] 王健. β -胡萝卜素乳液水凝胶微粒稳定性及消化特性的研究[D]. 南昌:南昌大学,2018.
- [19] 袁博,曹健,秦朗,等. 四种酚类化合物体外抗氧化活性的比较研究[J]. 食品工业,2018,39(9):200-204.
- [20] 刘慧敏. 不同植物油微量成分与抗氧化能力的相关性研究[D]. 江苏无锡:江南大学,2015.
- [21] 向卓亚,邓俊琳,陈建,等. 藜麦体外模拟消化过程中酚类物质含量及抗氧化活性的变化[J]. 中国食品学报,2021,21(8):283-290.
- [22] FLORES F P, SINGH R K, KERR W L, et al. Total phenolics content and antioxidant capacities of microencapsulated blueberry anthocyanins during in vitro digestion [J]. Food Chem,2014,153(15):272-278.
- [23] YDJEDD S, BOURICHE S, LÓPEZ-NICOLÁS R, et al. Effect of in vitro gastrointestinal digestion on encapsulated and nonencapsulated phenolic compounds of carob (*Ceratonia siliqua* L.) pulp extracts and their antioxidant capacity [J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(4):827-835.
- [24] 刘国艳,张洁,徐鑫,等. 体外消化对芹菜黄酮混合物和单体的含量及抗氧化应激能力的影响[J]. 食品科学,2018,39(18):8-14.

(上接第104页)