

两种不同壁材结构脂微胶囊的氧化稳定性与体外消化特性比较

孙永^{1,2}, 倪兴刚², 邓泽元², 李静², 潘丽娜¹, 彭小雨¹, 李威¹, 高宇¹, 汪家琦^{1*}

(1. 澳优乳业(中国)有限公司, 湖南长沙 410219)

(2. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西南昌 330047)

摘要: 该研究选择两种配方(配方1: 酪蛋白酸钠/麦芽糊精配方; 配方2: 乳清蛋白/乳糖配方)对结构脂进行包埋处理, 测定其氧化稳定性与体外消化特性相关指标并进行比较分析。结果表明: 在氧化稳定性方面, 结构脂原油经氧化后其过氧化值(Peroxide Value, POV)、硫代巴比妥酸反应物(Thiobarbituric Acid Reactivesubstances, TBARS)值与酸价分别增加了55.199 meq/kg、4.532 mg/kg和0.280 mg/g, 总单不饱和脂肪酸(Monounsaturated Fatty Acid, MUFA)与多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acid, PUFA)的含量分别减少了9.621%和15.664%; 配方1的POV值、TBARS值与酸价增加了16.438 meq/kg、1.348 mg/kg和0.124 mg/g, 总MUFA与PUFA减少了5.630%和9.368%; 配方2的POV值、TBARS值与酸价增加了13.255 meq/kg、1.176 mg/kg和0.127 mg/g, 总MUFA与PUFA减少了5.163%和8.551%。在体外消化特性方面, 结构脂原油在消化过程中的最大粒径、电位与脂肪酸释放率分别为907.6 nm、-20.45 mV和69.366%; 配方1分别为2355.5 nm、-10.15 mV和59.986%; 配方2则为1449.65 nm、-18.75 mV和65.365%。综上所述, 两种配方都显著提高了结构脂的氧化稳定性, 但配方1在消化过程中的粒径增大导致其脂肪酸释放率下降, 因此选择配方2作为结构脂的包埋壁材。

关键词: 壁材; 结构脂微胶囊; 氧化稳定性; 体外消化特性; 比较

文章编号: 1673-9078(2023)04-206-213

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0189

Comparison of the Oxidative Stability and *in Vitro* Digestive Properties of Structural Lipid Microcapsules Composed of Two Different Wall Materials

SUN Yong^{1,2}, NI Xinggang², DENG Zeyuan², LI Jing², PAN Lina¹, PENG Xiaoyu¹, LI Wei¹, GAO Yu¹, WANG Jiaqi^{1*}

(1. Ausnutria Institute of Food and Nutrition, Ausnutria Dairy (China) Co. Ltd., Changsha 410219, China)

(2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: Two different wall material formulations (formulation 1: sodium caseinate/maltodextrin; formulation 2: whey protein/lactose) were selected for the microencapsulation of structural lipids, and their oxidative stability and *in vitro* digestive properties were determined and compared. After oxidation, the peroxide value (POV), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), and acid value of unencapsulated structural lipids increased by 55.199 meq/kg, 4.532 mg/kg, and 0.280 mg/g, respectively, whereas their contents of total monounsaturated fatty acids (MUFAs) and polyunsaturated fatty acids (PUFAs) decreased by 9.621% and 15.664%, respectively. Meanwhile, the POV, TBARS, and acid value of encapsulated structural lipids with formulation 1 increased by 16.438 meq/kg, 1.348 mg/kg, and 0.124 mg/g respectively, whereas their total MUFA and PUFA contents decreased by 5.630% and 9.368%, respectively. Furthermore, the POV, TBARS, and acid value of encapsulated structural lipids with formulation 2 increased by

引文格式:

孙永,倪兴刚,邓泽元,等.两种不同壁材结构脂微胶囊的氧化稳定性与体外消化特性比较[J].现代食品科技,2023,39(4):206-213.

SUN Yong, NI Xinggang, DENG Zeyuan, et al. Comparison of the oxidative stability and *in vitro* digestive properties of structural lipid microcapsules composed of two different wall materials [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 206-213.

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 湖南省科协科技人才托举工程(2022TJ-XH-047); 湖南省营养健康品工程技术研究中心创新平台与人才计划(2019TP2066)

作者简介: 孙永(1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 脂质营养与健康, E-mail: yongsun@ncu.edu.cn

通讯作者: 汪家琦(1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 食品科学, E-mail: Jiaqi.wang@ausnutria.com

13.255 meq/kg, 1.176 mg/kg, and 0.127 mg/g, respectively, whereas their total MUFA and PUFA contents decreased by 5.163% and 8.551%, respectively. Regarding *in vitro* digestive properties, the maximum particle size, electric potential, and fatty acid release rate of unencapsulated structural lipids during digestion were 907.6 nm, -20.45 mV, and 69.366%, respectively. Meanwhile, these values were 2 355.5 nm, -10.15 mV, and 59.986%, respectively, for encapsulated structural lipids with formulation 1, and 1 449.65 nm, -18.75 mV, and 65.365%, respectively, for encapsulated structural lipids with formulation 2. In conclusion, both formulations can significantly improve the oxidative stability of structural lipids, although the larger particle size of encapsulated structural lipids with formulation 1 during digestion can delay fatty acid release; therefore, formulation 2 is considered ideal as a capsule wall material for structural lipids.

Key words: wall material; structural lipid microcapsules; oxidative stability; *in vitro* digestive properties; comparison

结构脂是将天然油脂通过化学法或者酶法修饰而得到的一类特殊脂质,结构脂由于具有一些特殊结构的脂质分子而使其具有一些特殊的理化特性,例如奶粉中添加 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(1,3-Dioleic Acid-2-Palmitoyl Triglyceride, OPO)可以更好地满足婴幼儿的营养需求^[1],周盛敏等^[2]通过将制备得到的富含中链脂肪酸的结构脂喂养小鼠发现其可以有效降低小鼠的体重,改善小鼠的脂代谢和肝脏甘油三酯水平。虽然结构脂是现在脂质改性的研究热点,但如何改善结构脂的氧化稳定性与消化特性同样是值得关注的焦点。

微胶囊技术是一种已经发展多年的成熟生产技术^[3],原理是利用一些具有包埋特性的材料对一些固体、液体或者气体进行包埋处理以满足某类特殊要求,微胶囊化方法有物理法、化学法和物理化学法三大类^[4,5],其中物理法中的喷雾干燥法应用是最为广泛的^[6]。微胶囊技术在各行各业都有非常多的运用,在食品行业,微胶囊技术通常应用于食品成分的包埋,通过微胶囊技术对一些食品成分进行包埋处理可以达到保护芯材、改变食品形态、提高食品保藏稳定性和减少营养流失等目的^[7-9]。油脂是一类容易被空气氧化而难以保存的食品成分,而运用微胶囊技术对油脂进行包埋处理不仅可以提升油脂的氧化稳定性还可以使油脂更加方便地运用到其他食品的生产中去,李夏等^[10]运用微胶囊技术成功制备得到椰子油微胶囊粉末并应用于代餐粉的生产中,张维等^[11]运用微胶囊技术制备得到具有高稳定性的榛子油微胶囊。

虽然利用微胶囊技术可以提高油脂的稳定性,但由于不同壁材具有不同的包埋特性,且不同壁材的配合使用所达到的包埋效果也有所差别。食品行业多采用蛋白质(乳清蛋白与酪蛋白等)与碳水化合物(麦芽糊精、环糊精与乳糖等)相互配合作为混合壁材对芯材进行包埋处理,黄进宝等^[12]选择麦芽糊精/大豆分离蛋白/阿拉伯胶作为混合壁材对茶籽油进行包埋处理得到高氧化稳定性的茶籽油微胶囊粉末,殷春燕等^[13]选择麦芽糊精和阿拉伯胶作为壁材对黄刺玫籽油进行包埋处理得到高氧化稳定性高热稳定性的黄刺

玫籽油微胶囊。在乳制品行业由于产品特殊性对于壁材的种类作了严格限制,因此多选用天然来源的乳蛋白作为包埋壁材。即使一种壁材搭配可以很好地提高油脂的稳定性,但同时也可能会影响油脂的消化特性导致油脂在体内难以释放从而影响油脂吸收^[14],因此综合考虑油脂微胶囊的氧化稳定性与消化特性对于壁材的选择意义重大。

实验选择了两种壁材配方制备结构脂微胶囊,两种壁材配方分别为酪蛋白酸钠(Natrium Caseinate, NaCN)/麦芽糊精(Malt Dextrin, MD)配方和乳清蛋白/乳糖配方,通过比较两种微胶囊的氧化稳定性与体外消化特性指标确定合适的壁材配方。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

结构脂通过酶法合成制得;酪蛋白酸钠(NaCN),和政县华龙乳制品有限公司;麦芽糊精(MD),山东东西王糖业有限公司;乳清蛋白,山东亿宝莱生物科技有限公司;乳糖,美国 Leprino Foods 公司;单甘脂,河南万邦化工科技有限公司;胃蛋白酶,上海 Aladdin 有限公司;黑曲霉脂肪酶,日本 Amano-enzyme 公司;胰酶与胆汁盐,美国 Sigma-Aldrich 公司;尼罗红染料,上海 Aladdin 有限公司;其他试剂(均为分析纯),上海西陇化工有限公司。

1.2 仪器与设备

30-6S 型均质机,上海东华高压均质机厂;MDR-50 150 型喷雾塔,锡山市现代喷雾干燥机厂;HJ-3 数显恒温磁力搅拌器,常州国华电器有限公司;6890N 气相色谱仪,美国 Agilent 公司;HH-S11 型恒温水浴锅,太仓科教材材厂;HG101-5 型电热鼓风干燥箱,南京实验仪器厂;DSY-III 型氮吹仪,北京金科科技有限公司;PHS-2 酸度计,上海精密科学仪器有限公司;激光共聚焦显微镜,德国 Carl Zeiss AG 公司;马尔文 2000 型粒度电位仪,英国马尔文公司。

1.3 方法

1.3.1 结构脂微胶囊的制备

称取占总固形物 38% (质量分数) 的结构脂作为芯材, 1% (质量分数) 的单甘脂作为乳化剂, 其余部分均为壁材, 两种微胶囊的壁材配方分别为配方 1 (NaCN:MD=1:1, *m/m*) 与配方 2 (乳清蛋白:乳糖=1:1, *m/m*)。先将称取的壁材溶于 60 °C 温水中搅拌 30 min 使其充分混匀, 再将单甘脂溶于结构脂中, 最后将油相缓慢倒入水相中 60 °C 搅拌 30 min 使两相充分混匀得到粗乳液, 将粗乳液经过均质机 30 MPa 下均质处理 10 min 后得到稳定的乳液, 得到的乳液再通过喷雾塔喷雾干燥得到结构脂微胶囊粉。

1.3.2 加速氧化实验

参考李晓龙等^[15]的烘箱加速氧化法进行实验, 称取一定量的原油 (未经过包埋的结构脂) 与结构脂微胶囊粉末置于小玻璃皿中, 放入 60 °C 的烘箱中加速氧化 25 d, 每隔 5 d 测定一次 POV 值、TBARS 值和酸价, 放入前与第 25 天拿出后对原油与微胶囊都进行脂肪酸的测定。

1.3.3 体外模拟消化实验

原油经单甘脂乳化后得到乳液, 微胶囊溶于温水中得到乳液。消化方法根据 Mánard 等^[16]与 Cheong 等^[17]的体外消化方法再加以修改, 取一定体积的乳液, 加入模拟胃液 (94 mmol/L 的 NaCl 与 13 mmol/L 的 KCl 的溶液), 乳液与胃液的体积比为 6:4, 混合后在 37 °C 水浴下持续搅拌, 消化过程用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液滴定消化液维持 pH 值为 5.3, 消化开始加入胃蛋白酶 (268 U/mL) 和脂肪酶 (19 U/mL), 37 °C 水浴下持续搅拌 1 h, 此阶段为模拟胃消化阶段。肠消化开始前用 0.2 mol/L 的 NaOH 调节消化液 pH 值至 7 使胃酶失活, 加入一定体积模拟肠液 (164 mmol/L NaCl、10 mmol/L KCl、85 mmol/L NaHCO₃、119 mmol/L CaCl₂), 加入胰酶 (300 U/mL) 和胆盐 (3.1 mmol/L), 搅拌持续 2 h, 消化过程用碱液滴定维持消化 pH 值为 6.6, 此阶段为模拟肠消化阶段。消化过程分别在胃消化 0、15、30 和 60 min, 分别记为 G0、G15、G30 和 G60 肠消化 15 min (I15)、30 min (I30)、60 min (I60)、120 min (I120) 时取样, 测定各取样时间点消化液的粒径电位与脂肪酸释放率, 每个消化阶段选择 2 个时间点对消化液进行激光共聚焦脂肪染色拍照。

1.3.4 微胶囊油脂的提取

称取 4 g 微胶囊粉末, 加入 4 mL 水混匀后再加入 10 mL 甲醇和 5 mL 氯仿, 涡流 2 min 后再加入 4 mL 水与 5 mL 氯仿, 涡流 1 min 后离心分层, 吸取有机层

后氮吹吹干得到油脂。

1.3.5 油脂 POV、TBARS、酸价的测定

POV 值按照 GB/T 5009.227-2016《食用中过氧化值的测定》中规定的滴定法测定^[18]; TBARS 值按照 GB/T 5009.181-2016《食用中丙二醛的测定》中规定的分光光度法测定^[19]; 酸价按照 GB/T 5009.229-2016《食用中酸价的测定》中规定的冷溶剂指示剂滴定法测定^[20]。

1.3.6 油脂脂肪酸测定

原油与提取得到的油脂的脂肪酸测定根据黄晓婉等^[21]的测定方法进行测定, 其中包括总脂肪酸的测定与 Sn-2 位脂肪酸的测定。

1.3.7 消化液粒径电位测定

消化液的粒径电位通过马尔文 2000 粒径电位仪测定, 吸取 1 mL 消化液转移至透明特制容器中, 在 25 °C 下测定消化液的粒径电位。

1.3.8 脂肪酸释放率测定

各个消化时间点的脂肪酸释放率根据 NaOH 溶液的滴定体积计算。计算公式如下:

$$R = \frac{C_0 \times V_t \times M \times 10^{-3}}{3 \times m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

R——脂肪酸释放率, %;

*C*₀——NaOH 溶液的浓度, 0.1 mol/L;

*V*_{*t*}——*t* min 时滴定消化液消耗 NaOH 溶液的累积体积, mL;

m——消化液中结构脂的质量, g;

M——结构脂的平均摩尔质量, g/mol。

1.3.9 微观结构的测定

消化过程中脂肪球的微观结构变化通过激光共聚焦显微镜测定。将 0.5 mL 的消化液与 20 μL 的尼罗红染料 (0.01% 质量分数) 混匀后于避光环境下孵育 30 min 完成染色^[22], 然后将染色液轻轻点到载玻片上, 改上盖玻片后与激光共聚焦显微镜下观察脂肪球的微观结构。

1.3.10 统计分析

本文中重复测定的结果以平均值 ± 标准差表示, 使用 SPSS 统计分析软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 油脂 POV 值

由图 1 可知, 未经过处理的结构脂原油在加速氧化过程中 POV 值急剧增加, 加速氧化结束时的 POV 值高达 56 meq/kg, 而经过包埋处理后的结构脂 POV

值在加速氧化过程中的增长幅度相较于原油明显减缓,到氧化结束时 POV 值都未超过 20 meq/kg (MD 配方为 18.135 meq/kg, 乳糖配方为 15.053 meq/kg)。虽然氧化开始阶段原油与包埋油脂的 POV 值的增长幅度基本一致,但氧化 10 d 后,原油 POV 值急剧增加,这可能是由于氧化初期阶段是生成大量自由基,此时氧化反应处于准备阶段因此氧化速率稳定,而氧化 10 d 后大量的自由基开始传递形成链式反应,氧化反应开始加速导致 POV 值急剧增加,说明两种配方包埋可能是通过降低氧化初期的自由基生成速率从而提高结构脂的抗氧化能力。POV 值动力学结果表明,结构脂原油的氧化动力学方程为一级方程,而经过包埋后结构脂的氧化动力学方程降为零级^[23],说明经过包埋处理后结构脂的氧化动力相对减小,三组动力学方程的相关系数均大于 0.95 说明方程拟合良好。综合比较得到,由于乳糖配方的 POV 值拟合曲线位于 MD

配方曲线下方,且乳糖配方的氧化动力小于 MD 配方(氧化动力学拟合曲线的斜率更小, $0.54285 < 0.67071$),说明在抑制结构脂 POV 值上升方面乳糖配方要优于 MD 配方。

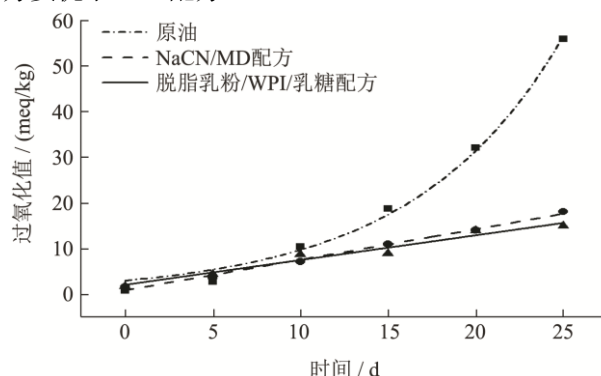


图 1 油脂 POV 值氧化动力学曲线

Fig.1 Oxidation kinetic curve of oil POV value

表 1 油脂 POV 值氧化动力学参数表

Table 1 Oxidation kinetic parameter table of POV value of oil

项目	原油	MD 配方	乳糖配方
动力学类型	一级	零级	零级
动力学方程	$\ln Y = 0.11735X + 1.10194$	$Y = 0.67071X + 0.90014$	$Y = 0.54285X + 2.07376$
R^2_{Adj}	0.9918	0.98616	0.95539

表 2 油脂 TBARS 值氧化动力学参数表

Table 2 Oxidation kinetic parameter table of oil TBARS value

项目	原油	MD 配方	乳糖配方
动力学类型	一级	零级	零级
动力学方程	$\ln Y = 0.05156X + 0.53358$	$Y = 0.05679X + 2.25548$	$Y = 0.04752X + 2.14933$
R^2_{Adj}	0.95913	0.95037	0.97865

2.2 油脂 TBARS 值

由图 2 可知, 未经过处理的结构脂原油在加速氧化过程中 TBARS 值急剧增加, 加速氧化结束时 TBARS 值高达 6.5 mg/kg, 而经过包埋处理的结构脂 TBARS 值在加速氧化过程中的增加幅度较原油明显减缓, 到氧化结束时 TBARS 值都未超过 4 mg/kg (MD 配方为 3.582 mg/kg, 乳糖配方为 3.292 mg/kg)。虽然氧化开始阶段原油与包埋油脂的 TBARS 值增加幅度基本一致, 但氧化 10 d 后, 原油 TBARS 值急剧增加, 这可能是由于氧化初期氧化速率稳定导致氧化产物生成也比较稳定, 而氧化 10 d 后氧化开始加速导致氧化产物开始大量生成使得 TBARS 值剧烈增加, 这也说明两种配方包埋均可以减少氧化过程中氧化产物的生成。TBARS 值动力学结果表明, 结构脂原油的动力学方程为一级方程, 而经过包埋后结构脂的动力学方程降为零级, 说明经过包埋处理的结构脂的氧化动力减

小, 三组动力学方程的相关系数均大于 0.95 说明方程拟合良好。综合比较得到, 由于乳糖配方的 TBARS 值拟合曲线位于 MD 配方曲线下方, 且乳糖配方的氧化动力小于 MD 配方(氧化动力学拟合曲线的斜率更小, $0.04752 < 0.05679$), 说明在抑制结构脂 TBARS 值上升方面乳糖配方要优于 MD 配方。

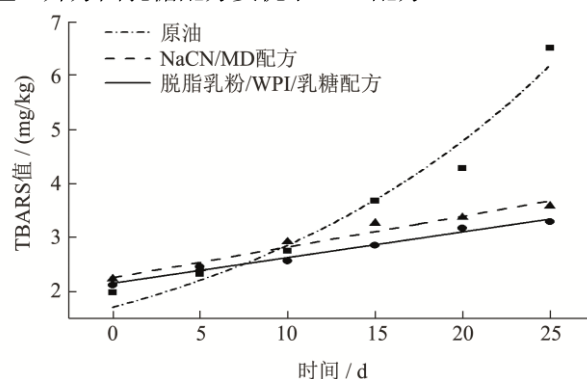


图 2 油脂 TBARS 值氧化动力学曲线

Fig.2 Oxidation kinetic curve of TBARS value of oil

2.3 油脂酸价

由图 3 可知, 氧化开始时包埋油脂的酸价要高于未经处理的原油 (原油酸价为 0.121 mg/g, MD 配方与乳糖配方酸价分别为 0.189 mg/g 和 0.198 mg/g), 这是由于微胶囊制备喷雾干燥过程中的高温处理会导致油脂酸价升高, 但随着氧化进行, 在氧化第 10 天与第 15 天期间酸价基本持平 (第 15 天原油酸价为 0.252 mg/g, MD 配方与乳糖配方酸价分别为 0.252 和 0.267 mg/g), 而后原油的酸价开始超过两种包埋油脂 (第 25 天原油酸价为 0.401 mg/g, MD 配方与乳糖配方酸价分别为 0.313 和 0.325 mg/g), 说明两种配方包埋处理都可以减缓氧化过程中结构脂酸价的增加, 即通过减少油脂氧化过程中游离脂肪酸的产生提高结构脂的氧化稳定性, 但由于两种配方结构脂酸价的变化趋势基本一致而无法直观比较得到哪种配方在抑制结构脂酸价上升方面更优异。

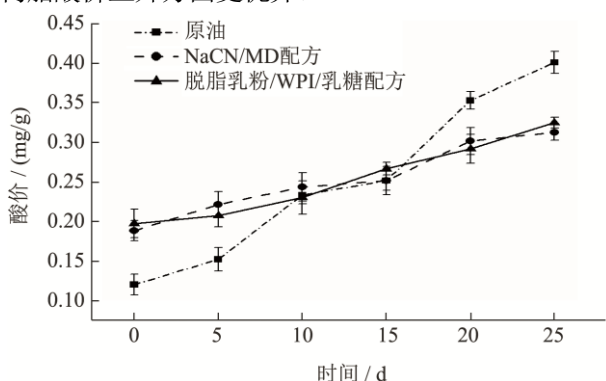


图 3 油脂酸价变化图

Fig.3 Changes in the acid value of oil

2.4 油脂脂肪酸变化

2.4.1 油脂总脂肪酸变化

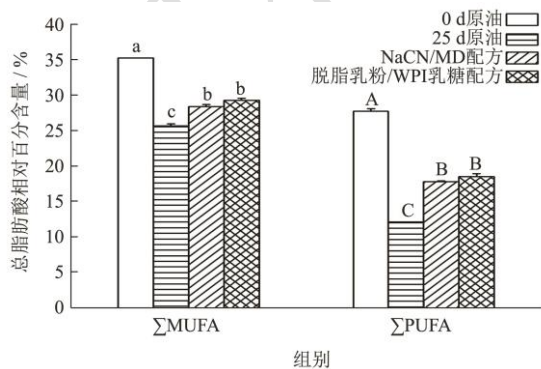


图 4 油脂总脂肪酸变化图

Fig.4 Changes in total fatty acids of oil

为研究结构脂的总脂肪酸在氧化过程中的变化, 在加速氧化开始与结束时对结构脂原油与包埋油脂都进行总脂肪酸测定, 测定结果见图 4。可知在加速氧

化第 0 天时, 未处理结构脂总脂肪酸中的单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸的百分含量均处于一个相对较高水平 (MUFA: 35.344%; PUFA: 27.841%), 而加速氧化进行至第 25 天时, 其单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸的百分含量显著减少 (MUFA: 25.723%; PUFA: 12.177%), 这是由于油脂中的不饱和脂肪酸被氧化为一些氧化产物而导致其含量降低, 而经过两种配方包埋处理后, 结构脂在氧化过程中不饱和脂肪酸的损失程度得到显著改善 (MD 配方 MUFA: 28.499%, PUFA: 17.854%; 乳糖配方 MUFA: 29.336%, PUFA: 18.561%), 说明两种壁材配方均可以减少结构脂中不饱和脂肪酸的氧化损失从而保护结构脂, 由于氧化结束时乳糖配方结构脂的不饱和脂肪酸百分含量要高于 MD 配方, 所以在减少结构脂总不饱和脂肪酸的损失方面乳糖配方要优于 MD 配方。

2.4.2 油脂 Sn-2 位脂肪酸变化

为研究结构脂的 Sn-2 位脂肪酸在氧化过程中的变化, 在加速氧化开始与结束时对结构脂原油与包埋油脂都进行 Sn-2 位脂肪酸测定, 测定结果见图 5。可知在加速氧化第 0 天时, 未处理结构脂 Sn-2 位脂肪酸中的单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸的含量均处于一个相对较高水平 (MUFA: 26.039%; PUFA: 9.794%), 而加速氧化进行至第 25 天时, 其单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸的百分含量显著减少 (MUFA: 17.814%; PUFA: 4.975%), 这同样是由于油脂中的不饱和脂肪酸被氧化为其它产物而导致其含量降低, 而经过两种配方包埋处理后, 结构脂 Sn-2 位上不饱和脂肪酸的氧化损失程度得到显著改善 (MD 配方 MUFA: 20.650%, PUFA: 6.647%; 乳糖配方 MUFA: 20.716%, PUFA: 6.415%), 说明两种壁材配方均可以减少结构脂 Sn-2 位上不饱和脂肪酸的氧化损失从而保护结构脂。

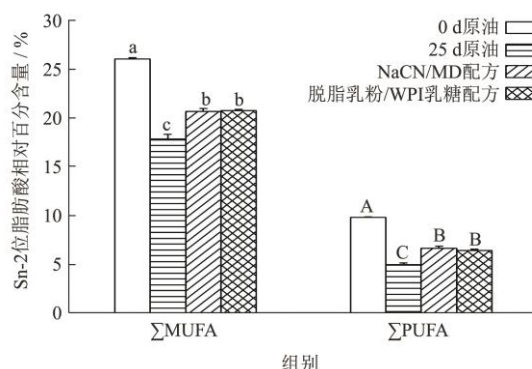


图 5 油脂 Sn-2 位脂肪酸变化图

Fig.5 Changes in Sn-2 fatty acids of oil

2.5 消化过程中的粒径变化

由图 6 可知, 原油与两种微胶囊在消化过程中粒径都呈现先升后降的趋势, 而微胶囊粒径在胃消化阶段迅速增大(胃消化结束时原油粒径为 694.05 nm, MD 配方与乳糖配方粒径分别为 2 355.5 和 1 449.65 nm), 而到肠消化阶段又迅速减小(肠消化结束时原油粒径为 598.3 nm, MD 配方与乳糖配方粒径分别为 862.85 和 677.75 nm), 这可能是由于在胃的酸性环境下微胶囊中的酪蛋白相互交联形成酪蛋白胶束使脂肪滴聚集^[24,25], 从而使粒径增大, 而 MD 配方中存在大量的酪蛋白, 因此其粒径增大的趋势更明显, 在肠消化阶段, 酪蛋白被胰蛋白酶作用而酶解, 脂肪滴得到分离并被脂肪酶作用从而使粒径减小, 而原油中由于缺乏这类蛋白成分因此在体外消化过程的脂肪球聚集现象不显著, 表现为粒径变化不明显。

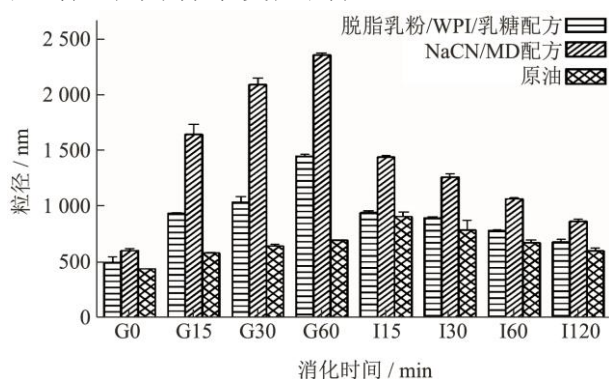


图 6 消化液粒径变化图
Fig.6 Particle size change graph

2.6 消化过程中的电位变化

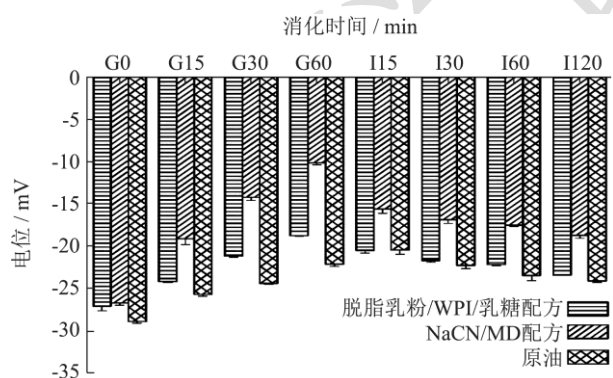


图 7 消化液电位变化图
Fig.7 Potential change graph

由图 7 可知, 原油与两种微胶囊的电位绝对值变化都是先下降再上升(胃消化阶段: 原油电位绝对值降低了 6.8 mV, MD 配方和乳糖配方分别降低了 16.55 mV 和 8.35 mV; 肠消化阶段: 原油电位绝对值升高了 2.0 mV, MD 配方和乳糖配方分别升高了 7.85 mV 和 4.65 mV), 而乳液电位绝对值大小与乳液稳定性呈正相关^[26], 因此 3 种消化液的稳定性都表现

为先失稳再回稳。电位绝对值在胃消化阶段的下降正是由于脂肪滴聚集导致的乳液稳定性下降, 而肠消化阶段的上升则是由于脂肪滴的分离与酶解使得乳液逐渐趋于稳定, 而 MD 配方微胶囊在胃消化阶段电位绝对值下降最为明显, 说明了该配方微胶囊在胃消化过程中最不稳定, 这可能归结于其胃消化过程中脂肪滴的大量聚集。

2.7 消化过程中的脂肪酸释放率

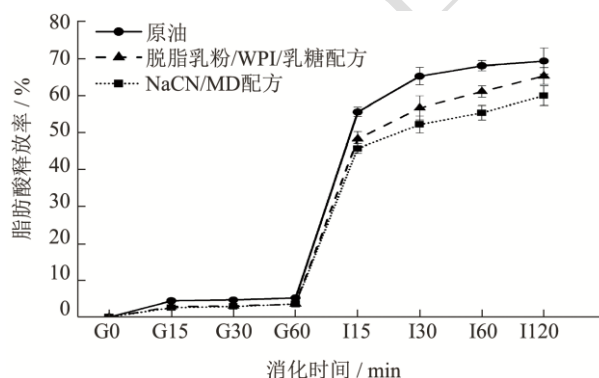


图 8 脂肪酸释放率变化图

Fig.8 Changes in fatty acid release rates

由图 8 可知, 在胃消化过程, 原油与两种包埋油的脂肪酸释放率都处于较低水平(胃消化结束时原油的脂肪酸释放率为 5.125%, MD 配方与乳糖配方分别为 3.565% 和 3.542%), 而进入肠消化阶段, 原油与包埋油的脂肪酸释放率都开始急剧上升, 肠消化 15 min 后原油的脂肪酸释放率为 55.602%, 而 MD 配方与乳糖配方分别为 45.689% 和 48.265%, 随着消化继续, 原油的脂肪酸释放率开始高于包埋油并逐渐保持恒定(肠消化结束时原油的脂肪酸释放率为 69.366%, MD 配方与乳糖配方分别为 59.986% 和 65.365%), 乳糖配方微胶囊的脂肪酸释放率要高于 MD 配方微胶囊, 但两种配方微胶囊的脂肪酸释放率在肠消化 120 min 时都还处于上升阶段。由于实验模拟的是婴幼儿的消化系统, 而婴幼儿的胃消化环境对于脂肪的酶解作用十分有限, 因此油脂在胃消化阶段的脂肪酸释放率处于低水平, 而进入肠消化阶段, 包埋油由于壁材的影响导致胰脂肪酶作用不充分, 使得包埋油的脂肪酸释放率一直低于原油, 而酶解时间的延长也导致其释放曲线一直处于上升阶段, MD 配方微胶囊中大量的预糊化淀粉对于内部油脂的释放影响显著, 这是由于婴幼儿肠道内胰淀粉酶含量较少^[27]难以完全酶解油脂外的淀粉壁材使得脂肪酶作用不充分。两种微胶囊的脂肪酸释放率都低于原油, 可能是由于壁材的存在影响了脂肪酶的作用, 乳糖配方的脂肪酸释放率要大于 MD 配方, 这可能是由于 MD 配方中含有大量的酪蛋

白,而酪蛋白的聚集降低了脂肪酶的酶解效果从而导致其较低的脂肪酸释放率。

2.8 消化过程中脂滴的微观变化

由图9可知,未经过处理的结构脂原油在胃肠消化过程的脂肪滴聚集现象不明显,脂肪球粒径大小没有明显变化,而MD配方的脂肪球在胃消化阶段发生明显的聚集现象,乳糖配方脂肪球在胃消化阶段也出现聚集现象,但较MD配方更不显著,而进入肠消化阶段,聚集的脂肪滴开始分离且粒径也逐渐减小。经过包埋处理的结构脂脂肪滴由于表面壁材的存在会导致脂肪球相互聚集,特别是MD配方中大量的酪蛋白酸钠在胃酸条件下形成酪蛋白胶束,导致脂肪球相互粘连,乳糖配方中少量的酪蛋白酸钠使得脂肪球的聚集现象较为轻微,而在肠消化阶段,酪蛋白胶束被胰蛋白酶作用酶解,脂肪球得以分离并暴露于脂肪酶作用环境下使得粒径不断减小,而未经过包埋处理的原油不受表面壁材的影响在胃肠消化过程中无明显变化。

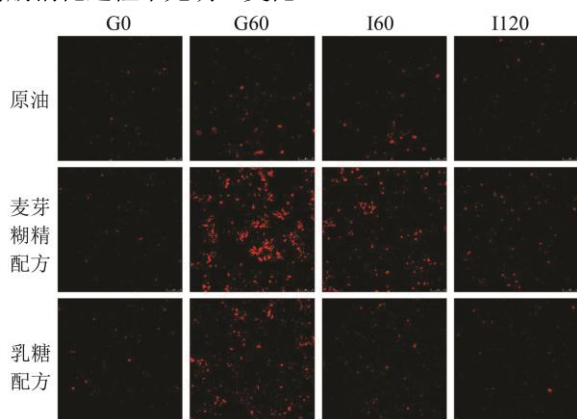


图9 激光共聚焦脂肪染色图

Fig.9 Fat staining micrograph

3 结论

本研究采用不同壁材配方(MD配方:酪蛋白酸钠/麦芽糊精配方;乳糖配方:乳清蛋白/乳糖配方)对结构脂进行包埋处理,通过加速氧化实验与体外消化实验探究不同壁材配方对结构脂微胶囊氧化稳定性与消化特性的影响。实验结果表明,在氧化稳定性方面,未包埋处理的结构脂经过氧化后的POV值、TBARS值与酸价分别增加了55.199 meq/kg、4.532 mg/kg和0.280 mg/g,总MUFA与PUFA的相对百分含量分别减少了9.621%和15.664%;采用MD配方包埋的结构脂的POV值、TBARS值与酸价分别增加了16.438 meq/kg、1.348 mg/kg和0.124 mg/g,总MUFA与PUFA的相对百分含量分别减少了5.630%和9.368%;而利用乳糖配方包埋的结构脂的POV值、

TBARS值与酸价分别增加了13.255 meq/kg、1.176 mg/kg和0.127 mg/g,总MUFA与PUFA的相对百分含量分别减少了5.163%和8.551%。而在体外消化特性方面,未包埋处理的结构脂在消化过程中的最大粒径、最大电位与最大脂肪酸释放率分别为907.6 nm、-20.45 mV和69.366%;配方1的最大粒径、最大电位与最大脂肪酸释放率分别为2355.5 nm、-10.15 mV和59.986%;配方2的最大粒径、最大电位与最大脂肪酸释放率分别为1449.65 nm、-18.75 mV和65.365%。综上所述,两种配方都显著提高了结构脂的氧化稳定性,但由于MD配方中大量酪蛋白的存在,使其在消化过程中容易形成酪蛋白胶束从而导致脂肪球相互聚集,而脂肪球的大量聚集会使得乳液失稳,同时影响脂肪酶的作用从而降低其脂肪酸释放率,因此低酪蛋白成分的乳糖配方更适合作为结构脂的包埋壁材。

参考文献

- [1] Zhu B, Zheng S, Lin K, et al. Effects of infant formula supplemented with prebiotics and OPO on infancy fecal microbiota: A pilot randomized clinical trial [J]. *Front Cell Infect Microbiol*, 2021, 11: 650407.
- [2] 周盛敏,姜元荣.中长链脂肪酸结构脂对小鼠脂质代谢的影响[J].*粮食与食品工业*,2020,27(3):34-38.
- [3] Yue H, Qiu B, Jia M, et al. Development and optimization of spray-dried functional oil microcapsules: Oxidation stability and release kinetics [J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(9): 4730-4738.
- [4] 卓祖优,宋生南,白小杰,等.天然高分子在微胶囊壁材中的应用[J].*包装工程*,2021,42(15):112-121.
- [5] 田云,卢向阳,何小解,等.微胶囊制备技术及其应用研究[J].*科学技术与工程*,2005,1:44-47.
- [6] 刘景艳,原现瑞,李巧玲.微胶囊技术在食品工业中的应用[J].*山西食品工业*,2005,4:26-28.
- [7] 刘金文,孔繁东,刘兆芳,等.食品工业中微胶囊技术的应用研究[J].*中国食品添加剂*,2014,6:148-151.
- [8] 孙艳伟,张泽生,王田心,等.微胶囊化酶在食品工业中的应用进展[J].*食品研究与开发*,2017,38(8):196-200.
- [9] 郝佳,贾丽娜.微胶囊技术在食品工业中的最新应用[J].*农产品加工*,2017,438(16):62-63.
- [10] 李夏,苏谕涵,谢光杰.椰子油微胶囊制备工艺优化及其在代餐粉中的应用[J].*粮食与油脂*,2022,35(1):87-91.
- [11] 张维,陈丽蕊,时孟杰,等.榛子油微胶囊的制备及其稳定性研究[J].*食品工业科技*,2022,43(2):206-214.
- [12] 黄进宝,唐冬,刘香菊,等.茶籽油微胶囊的制备及其产品特

- 性研究[J].中国粮油学报,2021,36(4):82-89.
- [13] 殷春燕,杨明建,穆谈航,等.黄刺玫籽油微胶囊的制备及其稳定性研究[J].食品科技,2021,46(2):151-157.
- [14] 王慧梅,范艳敏,王连艳.基于微胶囊技术对油脂包埋的研究进展[J].现代食品科技,2018,34(10):271-280.
- [15] 李晓龙.粉末油脂氧化稳定性分析方法的评估[D].无锡:江南大学,2016.
- [16] O M énard, C Bourlieu, S C De Oliveira, et al. A first step towards a consensus static *in vitro* model for simulating full-term infant digestion [J]. Food Chemistry, 2018, 240: 338-345.
- [17] Cheong L Z, Jiang C, He X, et al. Lipid profiling, particle size determination, and *in vitro* simulated gastrointestinal lipolysis of mature human milk and infant formula [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(45): 12042-12050.
- [18] GB/T 5009.227-2016,食用中过氧化值的测定[S].
- [19] GB/T 5009.181-2016,食用中丙二醛的测定[S].
- [20] GB/T 5009.229-2016,食品中酸价的测定[S].
- [21] 黄晓婉.婴儿配方奶粉油脂微胶囊工艺及其稳定性研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [22] Bradley J, Pope I, Masia F, et al. Quantitative imaging of lipids in live mouse oocytes and early embryos using CARS microscopy [J]. Development, 2016, 143(12): 2238-2247.
- [23] Cong S, Dong W, Zhao J, et al. Characterization of the lipid oxidation process of robusta green coffee beans and shelf life prediction during accelerated storage [J]. Molecules, 2020; 25(5): 1157.
- [24] Welch-Jernigan R J, Abrahamse E, Stoll B, et al. Postprandial amino acid kinetics of milk protein mixtures are affected by composition, but not denaturation, in neonatal piglets [J]. Curr Dev Nutr, 2018; 3(4): 102.
- [25] Zhang J, Wolf B. Physico-chemical properties of sugar beet pectin-sodium caseinate conjugates via different interaction mechanisms [J]. Foods, 2019, 8(6): 192.
- [26] Sharma M, Mann B, Sharma R, et al. Sodium caseinate stabilized clove oil nanoemulsion: physicochemical properties [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 38-46.
- [27] Lindquist S, Hernell O. Lipid digestion and absorption in early life: an update [J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2010, 13(3): 314-320.