

三种乳化剂对橄榄油乳液稳定性的影响

张彩虹^{1,2,3}, 黄立新^{2,3}, 谢普军^{2,3}, 邓叶俊^{2,3}, 成江^{2,3}, 刘璐婕^{2,3}

(1. 中国林业科学研究院 林业新技术研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院 林产化学工业研究所, 生物质化学利用国家工程实验室, 国家林业局林产化学工程重点开放性实验室, 江苏省生物质能源与材料重点实验室, 南京 210042; 3. 南京林业大学 林业资源高效加工利用协同创新中心, 南京 210037)

摘要: 乳化剂因亲水亲油平衡值的不同对油脂乳化效果表现出固有的差异, 但这种差异会因加入辅助剂的影响而发生改变。以非离子型表面活性剂单甘酯、蔗糖酯和吐温 20 为乳化剂, 以白果直链淀粉及阿拉伯胶(质量比 1:1)为辅助剂, 对橄榄油进行乳化, 考察了辅助剂加入前后在不同制备方法(先油后水和先水后油工艺)和乳化剂添加量下乳液的稳定性。结果表明: 单独使用乳化剂时, 经外观观察, 在三种乳化剂添加量相同时, 吐温 20 的橄榄油乳液稳定性较好, 其次为蔗糖酯、单甘酯; 加入辅助剂后, 乳液的乳化状态较单一加入乳化剂的好, 乳液黏度、粒径和浑浊度均随着乳化剂添加量的增大呈先减小后增加趋势, 且在相同添加量下, 由蔗糖酯制备的橄榄油乳液黏度较低, 粒径和浑浊度较小, 稳定性较好, 吐温 20 及单甘酯次之; 辅助剂加入前后, 先油后水工艺制备的橄榄油乳液的稳定性总体优于先水后油工艺的。

关键词: 橄榄油乳液; 协同作用; 乳液稳定性; 黏度; 浑浊度; 粒径

中图分类号: TS225.1; TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2021)03-0028-07

Effects of three emulsifiers on the stability of olive oil emulsion

ZHANG Caihong^{1,2,3}, HUANG Lixin^{2,3}, XIE Pujun^{2,3}, DENG Yejun^{2,3},
CHENG Jiang^{2,3}, LIU Lujie^{2,3}

(1. Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Key Lab. of Biomass Energy and Material of Jiangsu Province, Key and Open Lab. of Forest Chemical Engineering of State Forestry Administration, National Engineering Lab. for Biomass Chemical Utilization, Institute of Chemical Industry of Forest Products of Chinese Academy of Forestry, Nanjing 210042, China;
3. Co-Innovation Center of Efficient Processing and Utilization of Forest Resources,
Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Emulsifiers have inherent differences in the emulsification effect of oils due to the difference in hydrophilic and lipophilic balance values. However, the inherent difference can be broken by adding auxiliary reagent. With ionic surfactants monoglyceride, sucrose ester and Tween 20 as emulsifiers, and ginkgo amylose and gum arabic (mass ratio of 1:1) as auxiliary agents, the olive oil emulsion was prepared. The stability of olive oil emulsions were studied under different preparation methods (first oil then water and first water then oil) and different amounts of emulsifier added. The results showed that when the emulsifier was used alone, the stability of olive oil emulsion with Tween 20 as emulsifier was

better in terms of appearance when the three emulsifiers were added at the same amount, followed by sucrose ester and monoglyceride. After auxiliary reagent was added, the emulsification state of the emulsion was improved. The viscosity, particle size and turbidity of the emulsion first decreased and then increased with

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2020-11-06

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2018SY028)

作者简介: 张彩虹(1979), 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向为林果资源利用与装备开发技术(E-mail) zch@caf.ac.cn.

通信作者: 黄立新, 研究员, 博士生导师, 博士(E-mail) l_x_huang@163.com.

the increase of the amount of emulsifier, and the stability of olive oil emulsion with sucrose ester as emulsifier was better with lower viscosity, particle size and turbidity than that with Tween 20 and monoglyceride at the same amount. Before and after adding the auxiliary agents, the stability of the olive oil that prepared by first oil then water was better than that prepared by first water then oil method.

Key words: olive oil emulsion; synergistic effect; emulsion stability; viscosity; turbidity; particle size

橄榄油富含脂溶性维生素 A、D、E、K 及多种微量元素, 不饱和脂肪酸达 82% ~ 87%^[1-2], 但由于不饱和脂肪酸和生物活性成分对光及氧化剂都极其敏感^[3-4], 于空气中易被氧化, 降解后产生令人不快的挥发性醛类和乙烯基酮类等物质^[5], 使橄榄油风味受损, 营养价值被破坏, 因此考虑采用微胶囊技术对橄榄油进行包埋。目前关于油脂的微胶囊化也有一些研究^[6-9], 但橄榄油的微胶囊化相关研究较少。

乳化剂是微胶囊化过程中必不可少的原料, 其可降低水的表面张力, 在油水界面上形成一层具有一定机械强度的界面膜, 防止液滴在碰撞过程中聚结变大, 从而使乳液更稳定^[10-12]。目前, 允许使用的食品乳化剂约 65 种, 常用的有单甘酯、蔗糖酯、吐温、大豆磷脂、硬脂酰乳酸钙等^[13]。食品乳化剂正在向系列化、复配化^[14]、多功能、高效率、便于使用等方面发展^[15-16]。本研究以橄榄油为芯材, 以常用食品级非离子型表面活性剂单甘酯、蔗糖酯和吐温 20(聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯) 作为乳化剂制备水包油型乳液。据文献报道, 乳化剂的加入顺序会对乳液性能产生影响, 在水中先加入乳化剂能形成胶束, 在油中先加入乳化剂易于形成反胶束, 在反胶束中逐渐加入水后又形成胶束, 且形成的胶束颗粒度比直接形成的胶束颗粒度小, 从而增强油脂的乳化效果。而非离子型表面活性剂在水溶液中胶束的形状不像离子型表面活性剂一样在不同阶段有相应形状及聚集数可参考。因此, 本实验采用两种方法制备橄榄油乳液, 研究乳化剂对两种方法制备的橄榄油乳液稳定性的影响, 并对添加辅助剂的乳液稳定性进行研究, 以期对油脂乳化剂复配提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

特级初榨橄榄油, 陇南田园橄榄科技发展有限公司提供; 白果直链淀粉, 由泰兴白果(大佛指)自提、改性制备; 单甘酯、蔗糖酯、吐温 20、阿拉伯胶等, 上海九亿化学试剂有限公司。

AR2140 电子天平, 奥豪斯公司; T18 搅拌器、ETS-D5 搅拌器, IKA; DV2TLVTJ0 黏度计, Ametek

Brookfield; T6 紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; DLS 激光动态纳米粒度仪, 英国马尔文公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳液的制备

分别以吐温 20、单甘酯、蔗糖酯为乳化剂对橄榄油进行乳化, 制备水包油(O/W)型乳液。乳化剂及水油配比方案如表 1 所示。

表 1 乳化剂及水油配比方案

乳化剂/mg	橄榄油/mL	水/mL
10	10	60
20	10	60
30	10	60
40	10	60
50	10	60

先水后油工艺(水油法): 将 1 份乳化剂置于 100 mL 烧杯内, 加热熔化后, 加入 60 mL 50℃ 热水中高速搅拌, 生成乳白的水合物混合液后, 冷却到室温, 边搅拌边加入 10 mL 橄榄油, 后在 15 000 r/min 搅拌 8 min, 静置 30 min 后, 观测乳液分层情况。再加入 1 g 白果直链淀粉搅拌均匀后, 加入 1 g 阿拉伯胶, 搅拌均匀, 静置 30 min, 测定黏度、浑浊度和平均粒径。

先油后水工艺(油水法): 将 1 份乳化剂置于 100 mL 烧杯内, 加热熔化后, 加入 10 mL 橄榄油中, 生成乳白的乳液后, 边搅拌边加入 60 mL 50℃ 热水, 后在 15 000 r/min 搅拌 8 min, 静置 30 min 后, 观测乳液分层情况。再加入 1 g 白果直链淀粉搅拌均匀后, 加入 1 g 阿拉伯胶, 搅拌均匀, 静置 30 min, 测定黏度、浑浊度和平均粒径。

1.2.2 检测方法

乳液分层情况: 将未添加辅助剂(白果直链淀粉及阿拉伯胶)的橄榄油乳液于水平操作台面上静置 30 min 后, 观察清油层、絮凝层、乳状液层, 并通过图片记录分层情况。

黏度测定: 在常温条件下, 以 10 000 r/min 的转速搅拌乳液样品 5 min 后, 取 16 mL 乳液放入黏度计进行测定, 将黏度计的转子转速设定为 60 r/min,

时间设置为 30 s, 采用多点测量, 每 10 s 采集 1 次数据, 共采集 3 个黏度值, 计算平均值。

浑浊度测定: 根据朗伯 - 比尔定律, 以透过光的强度, 即吸光度来确定样品的浑浊度, 样品浑浊度与吸光度成正比, 与透光率的负对数呈线性关系^[17]。先采用紫外可见分光光度计对乳液进行全波长测试, 选取幅度稳定的 800 nm 作为乳液的浑浊度测试波长。取 1 mL 乳液样品, 在常温下用去离子水稀释 10 倍, 以 10 000 r/min 的转速搅拌样品乳液 5 min 后, 以去离子水作为空白, 用玻璃比色皿于 800 nm

波长下测定乳液的吸光度。

平均粒径测定: 取一定量乳液加入去离子水制备成质量浓度为 1 mg/mL 的样品, 上样 500 μ L 到激光动态纳米粒度仪中, 温度控制在 25 $^{\circ}$ C, 检测 3 批样品, 计算平均粒径。

2 结果与分析

2.1 添加辅助剂前不同乳化剂对橄榄油乳化性能的影响

图 1 为添加辅助剂前橄榄油乳液的直观图。



图 1 添加单甘酯、蔗糖酯和吐温 20 橄榄油乳液的静置分层情况

由图 1 可知: 乳化剂为单甘酯时分层明显, 乳状液层和清油层较厚, 絮凝层非常薄; 随着单甘酯添加量的增加, 各层变化较小, 这表明单甘酯对水包油型

乳液的乳化效果微弱, 这符合单甘酯的亲水亲油平衡值 (HLB) 较低, 亲油能力较强的特性。由图中还发现, 在单甘酯添加量为 10、20、30、40 mg 时, 先油

后水的乳液均比先水后油的乳液澄清,当单甘酯添加量增加到 50 mg 时,先水后油乳液仍为淡白色,变化不大,但先油后水的乳液失去了澄清状态,变为与先水后油乳液同样的淡白色,这一现象表明在单甘酯添加量较低的状态下,将单甘酯与橄榄油先混合,再加水所制备的橄榄油乳液乳化效果较好,颗粒不易聚结;随着单甘酯添加量的增加,乳化作用增强,由乳液制备方法所造成的差异逐渐减小。这与邝婉涓等^[18]的实验结果相符合。

乳化剂为蔗糖酯时分层也较明显,但较单甘酯有所改善,乳液变为不透明的乳白色。随着蔗糖酯添加量的增加,先油后水工艺制备的橄榄油乳液絮凝层变化不明显,乳状液层乳白程度逐渐增加,清油层逐渐减少,在添加量为 50 mg 时清油层几乎消失;先水后油工艺制备的橄榄油乳液絮凝层先增加(10~40 mg)后减少(50 mg),至 50 mg 时絮凝层几乎消失,而清油层在添加量为 10~40 mg 时随添加量增加逐渐减少,至 50 mg 时表面又有少量清油析出,乳状液层色泽由淡白色逐渐变为微黄色(乳状液中橄榄油油滴较大),最后又转为乳白色。这一现象是因为蔗糖酯与油混合后加入过量水制备的橄榄油乳液液滴均匀且粒径较小,不易形成絮凝层,乳液更加稳定;而蔗糖酯与水混合后加入橄榄油形成的橄榄油乳液液滴大小不匀,且偏大,容易形成絮凝层,液滴易于聚结,从而加速分层,但这种现象随着蔗糖酯添加量的增加而有所减弱。

吐温 20 为乳化剂时,乳化效果较单甘酯和蔗糖酯都明显有所改善,吐温 20 添加量为 10 mg 时清油层消失,仅有絮凝层(含有大的橄榄油油滴,显淡黄色)和乳状液层。随着吐温 20 添加量的增加,无论先油后水还是先水后油两种工艺乳化效果都逐渐提高。当吐温 20 添加量增加至 40 mg 时,先油后水工艺获得的乳液絮凝层变小,色泽由淡黄色转微白色,与乳状液层的界限模糊,均一稳定性显著提高;先水后油工艺获得的橄榄油乳液絮凝层虽然黄色略有变淡,但絮凝层的黄色与乳状液层的白色仍能分辨。继续增加吐温 20 添加量至 50 mg 时,两种工艺获得的橄榄油乳液重新开始出现分层,且絮凝层及乳状液层界限清晰,乳状液层较吐温 20 添加量 40 mg 时澄清。该现象可能是吐温 20 添加量为 40 mg 时已经接近临界胶束浓度,继续增加吐温 20 添加量时,溶液才会发生反常现象。Mcbain 等^[19]提出,表面活性剂溶液达到临界胶束浓度后所出现的反常现象,是由于表面活性剂分子或离子自动缔合成胶体大小的质点引起的。

根据图 1,在乳化剂添加量相同(除 50 mg)的情况下比较单甘酯、蔗糖酯、吐温 20 对橄榄油的乳化效果可知,乳化效果强弱顺序为吐温 20 > 蔗糖酯 > 单甘酯,单甘酯的乳化能力十分有限,仅有少部分橄榄油被乳化,这与乳化剂的 HLB 及自身性能有关。而即使在同一乳化剂的乳化作用下,先水后油和先油后水两种工艺所产生的乳化效果也有差别,先油后水乳化效果略有优势。

2.2 添加辅助剂后不同乳化剂对橄榄油乳液稳定性的影响

橄榄油与乳化剂形成的乳液因辅助剂白果直链淀粉及阿拉伯胶的加入,静置后乳液分层现象基本消失,仅剩乳状液层,无法从乳液外观判断乳液稳定性。经查阅文献发现乳液的稳定性受搅拌转速、乳化时间、含水率、温度等工艺条件的影响,并且还与乳化剂的种类、乳液黏度、乳化水特性、乳液中液滴粒径相关。本研究是在相同工艺条件下将等量的白果直链淀粉及阿拉伯胶加入橄榄油乳液中,且实验中均采用去离子水作为连续相,故工艺条件及水的影响不会产生差异,影响乳液稳定性的仅为乳化剂种类、乳液黏度及液滴粒径。乳化剂的种类为本研究的已知因素,因此乳液黏度、浑浊度及液滴粒径成为评判橄榄油乳液稳定性的依据。

2.2.1 乳液黏度(见图 2~图 4)

黏度是液体流动时所表现出来的内摩擦力,在流动相及分散相比比例相同时,分散相液滴粒径越小,乳液流动性越好,内摩擦力越小,黏度越低,越稳定;反之,分散相液滴粒径越大,乳液均一性及流动性较差,液滴间易于碰撞聚结,内摩擦力越大,黏度越高。

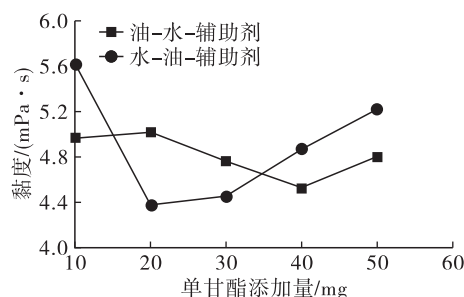


图 2 添加单甘酯和辅助剂橄榄油乳液的黏度

由图 2 可看出,加入白果直链淀粉及阿拉伯胶后,随着单甘酯添加量的增加,水油法及油水法制备的乳液黏度总体上均呈现先下降后升高的趋势,水油法在单甘酯添加量为 20 mg 时黏度达到最低值(4.37 mPa·s),而油水法在单甘酯添加量为 40 mg 时黏度达到最低值(4.53 mPa·s)。单甘酯水油法乳液最低黏度较油水法的低,稳定性较油水法好,与

单一乳化剂时乳化状态有所不同。这是由于白果直链淀粉不仅对油脂具有吸附作用,还可与单甘酯形成不溶性络合物悬浮在乳液中,提高乳液的稳定性,而且乳液稳定性受油及单甘酯与白果直链淀粉协同作用的影响较大,当达到稳定值范围后,增加乳化剂或辅助剂都会使乳液稳定性被破坏,这也是随着单甘酯添加量增加乳液黏度出现先减小后增大的原因。

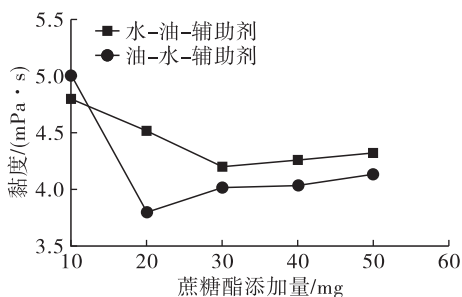


图3 添加蔗糖酯和辅助剂橄榄油乳液的黏度

由图3可看出:在加入白果直链淀粉及阿拉伯胶后,随着蔗糖酯添加量的增加乳液黏度急剧下降,油水法乳液在蔗糖酯添加量为20 mg时黏度低于水油法的,且达到最低值,而后缓慢增大,但变化幅度较小;水油法橄榄油乳液在蔗糖酯添加量为30 mg时,黏度达到最低值,而后随蔗糖酯添加量增加变化较小,但黏度值均在油水法之上。加入白果直链淀粉与阿拉伯胶后橄榄油乳液的稳定态较单一蔗糖酯时提前出现(单一蔗糖酯时在50 mg处),可见白果直链淀粉对油脂的吸附作用及阿拉伯胶的两亲性有助于油脂的乳化,提高了乳液稳定性。

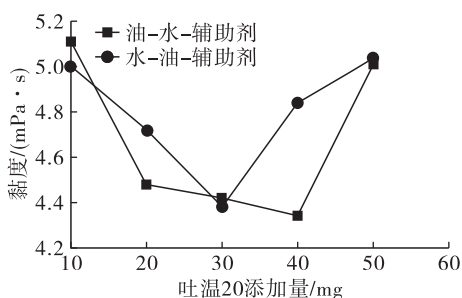


图4 添加吐温20和辅助剂橄榄油乳液的黏度

由图4可看出,由吐温20制备的橄榄油乳液加入白果直链淀粉及阿拉伯胶后,黏度也随着吐温20添加量的增加呈现先减小后增加的趋势,油水法和水油法分别在吐温20添加量为40 mg和30 mg时黏度出现最低值,且最低值相差不大,这与单一吐温20时橄榄油乳液出现稳定态位置(吐温20添加量40 mg)基本相同,可见在吐温20为乳化剂时,白果直链淀粉及阿拉伯胶对乳液的稳定性影响不大。

比较三种乳化剂与白果直链淀粉及阿拉伯胶协

同作用的乳化效果,根据最低黏度值可得:蔗糖酯(油水法) < 蔗糖酯(水油法) < 吐温20(油水法) < 吐温20(水油法) < 单甘酯(水油法) < 单甘酯(油水法)。黏度越大,乳液稳定性越差,黏度越小,乳液稳定性越好,因此乳液稳定性大小顺序为蔗糖酯(油水法) > 蔗糖酯(水油法) > 吐温20(油水法) > 吐温20(水油法) > 单甘酯(水油法) > 单甘酯(油水法)。

2.2.2 乳液浑浊度及平均粒径(见图5~图7)

乳液稳定性可通过乳液浑浊度及平均粒径来表征,液滴平均粒径越大,乳液稳定性越差,透光率越小,吸光度越高^[20],浑浊度越高;反之,液滴平均粒径越小,乳液稳定性越好,透光率越大,吸光度越小,浑浊度越低。

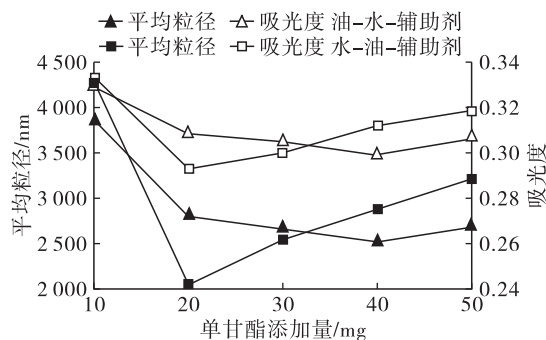


图5 添加单甘酯和辅助剂橄榄油乳液的平均粒径及吸光度

由图5可看出,橄榄油乳液的平均粒径及吸光度随乳化剂添加量的增加均呈先减小后增加的趋势,由于制备工艺的差异导致乳液平均粒径及吸光度最低点发生变化。当采用油水法制备乳液时,橄榄油乳液在单甘酯添加量为40 mg时平均粒径最小,吸光度最低;当采用水油法制备乳液时,二者在单甘酯添加量为20 mg时达到最低值。这说明当采用单甘酯作为乳化剂时,水油法乳液平均粒径较小,浑浊度较低,乳液稳定性更好,更利于橄榄油的乳化,这一结果与黏度结果相吻合。

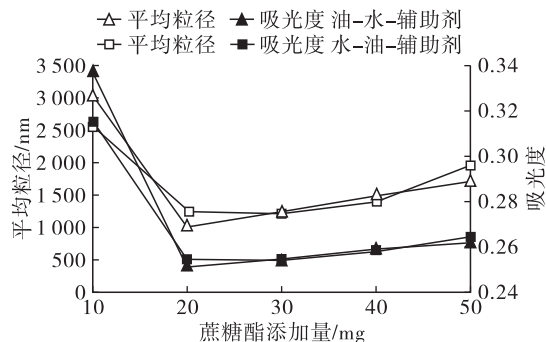


图6 添加蔗糖酯和辅助剂橄榄油乳液的平均粒径及吸光度

由图6可看出,添加辅助剂后橄榄油乳液的平均粒径及吸光度随蔗糖酯添加量的增加仍呈先减小

后增加的趋势,与添加单甘酯的乳液变化趋势相同,但平均粒径及吸光度显著低于单甘酯橄榄油乳液。根据稳定性与平均粒径、吸光度相反的特性,因此蔗糖酯橄榄油乳液稳定性优于单甘酯橄榄油乳液。油水法的蔗糖酯橄榄油乳液最低吸光度及最小平均粒径均略低于水油法,故其稳定性略优。

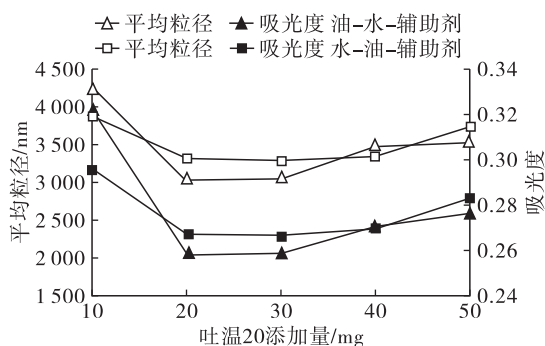


图7 添加吐温20和辅助剂橄榄油乳液的平均粒径及吸光度

由图7可看出,添加辅助剂橄榄油乳液的平均粒径及吸光度随吐温20添加量的增加呈先减小后增加的趋势,与单甘酯及蔗糖酯橄榄油乳液趋势相似,但吐温20橄榄油乳液的平均粒径及吸光度介于二者之间。且制备工艺无论先油后水还是先水后油,获得的乳液最小平均粒径及最低吸光度均出现在吐温20添加量为20~30 mg范围内,此范围内先油后水工艺获得的乳液平均粒径及吸光度略小于先水后油工艺。根据稳定性与平均粒径、吸光度呈反向关系,因此先油后水工艺制备的橄榄油乳液稳定性优于先水后油工艺。

综上所述,橄榄油乳液在蔗糖酯为乳化剂时吸光度最低,其次为吐温20、单甘酯。吸光度越小,浑浊度越低,乳液平均粒径越小,乳液越稳定,因此由三种乳化剂制备的橄榄油乳液的稳定性大小顺序为蔗糖酯>吐温20>单甘酯,这与橄榄油乳液黏度变化趋势相吻合。可见两亲性高聚物同非离子型表面活性剂可在溶液内部缔合,形成性能稳定的橄榄油乳液。

3 结论

在乳化剂添加量相同的情况下,采用乳液分层情况比较单甘酯、蔗糖酯、吐温20对橄榄油的乳化效果,结果发现:吐温20乳化效果最佳,蔗糖酯次之,单甘酯较弱;且在同一乳化剂的乳化作用下,先油后水较先水后油工艺乳化效果略有优势。

当在上述添加了乳化剂的橄榄油乳液中加入白果直链淀粉及阿拉伯胶后,测试乳液黏度、浑浊度及液滴平均粒径,结果发现,橄榄油乳液稳定性均有所提升。橄榄油乳液黏度及浑浊度均表现出随乳化剂添加量的增加呈先减小后增加的趋势,且每种乳化

剂的最佳添加量较单一乳化剂时均有所减少,表明白果直链淀粉及阿拉伯胶的加入有助于橄榄油的乳化,而且由于乳化剂与白果直链淀粉及阿拉伯胶协同作用的影响,乳化剂的乳化性能也发生变化,此时蔗糖酯乳化的橄榄油乳液稳定性最优,吐温20次之,单甘酯较弱。

参考文献:

- [1] 王毅谦, 曹文忠, 杨雪芬. 液体黄金——橄榄油[J]. 中国检验检疫, 2008(7):62-63.
- [2] VISIOLI F, DAVALOS A, LÓPEZ DE LAS HAZAS M C, et al. An overview of the pharmacology of olive oil and its active ingredients[J]. Brit J Pharmacol, 2020, 177(6): 1316-1330.
- [3] VISIOLI F, BELLOMO G, GALLI C. Free radical - scavenging properties of olive oil polyphenols[J]. Biochem Biophys Res Commun, 1998, 247(1):60-64.
- [4] DI MATTIA C, PARADISO V M, ANDRICH L, et al. Effect of olive oil phenolic compounds and maltodextrins on the physical properties and oxidative stability of olive oil O/W emulsions[J]. Food Biophys, 2014, 9(4):396-405.
- [5] CAVALLI J F, FERNANDEZ X, LIZZANI - CUVELIER L, et al. Comparison of static headspace, headspace solid phase microextraction, headspace sorptive extraction, and direct thermal desorption techniques on chemical composition of French olive oils[J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(26):7709-7716.
- [6] ZHOU D, ZHOU F, MA J, et al. Microcapsulation of *Ganoderma lucidum* spores oil: evaluation of its fatty acids composition and enhancement of oxidative stability[J]. Ind Crops Prod, 2019, 131:1-7.
- [7] SHAMAEI S, SEHIEDLOU S S, AGHBASHLO M, et al. Microencapsulation of walnut oil by spray drying: effects of wall material and drying conditions on physicochemical properties of microcapsules[J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2017, 39:101-112.
- [8] CHANG H W, TAN T B, TAN P Y, et al. Microencapsulation of fish oil - in - water emulsion using thiol - modified β - lactoglobulin fibrils - chitosan complex [J/OL]. J Food Eng, 2020, 264: 109680 [2019-04-01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2019.07.27>.
- [9] KARIMI SANI I, ALIZADEH M, PIRSA S, et al. Impact of operating parameters and wall material components on the characteristics of microencapsulated *Melissa officinalis* essential oil[J]. Flavour Fragr J, 2019, 34(2):104-112.
- [10] AHANGARAN F, HAYATY M, NAVARCHIAN A H, et al. Micromechanical assessment of PMMA microcapsules containing epoxy and mercaptan as self - healing agents [J]. Polym Test, 2017, 64:330-336.

(下转第47页)

- 2014, 49(9): 1562 - 1569.
- [15] ZHENG X Q, LI L T, LIU X L, et al. Production of hydrolysate with antioxidative activity by enzymatic hydrolysis of extruded corn gluten [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2006, 73(4): 763 - 770.
- [16] 刘素稳. 马铃薯蛋白质营养价值评价及功能性质的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2008.
- [17] KONG B, XIONG Y L. Antioxidant activity of zein hydrolysates in a liposome system and the possible mode of action[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(16): 6059 - 6068.
- [18] ZHENG Z J, SI D Y, AHMAD B, et al. A novel antioxidative peptide derived from chicken blood corpuscle hydrolysate[J]. Food Res Int, 2018, 106: 410 - 419.
- [19] PHONGTHAI S, D'AMICO S, SCHOENLECHER R, et al. Fractionation and antioxidant properties of rice bran protein hydrolysates stimulated by in vitro gastrointestinal digestion[J]. Food Chem, 2018, 240: 156 - 164.
- [20] 徐飞, 成向荣, 施用晖, 等. 双酶水解玉米醇溶蛋白制备抗氧化肽的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2015, 37(11): 218 - 227.
- [21] LI Y Y, KONG B H, LIU Q, et al. Improvement of the emulsifying and oxidative stability of myofibrillar protein prepared oil - in - water emulsions by addition of zein hydrolysates [J]. Process Biochem, 2017, 53: 116 - 124.
- [22] JIN J E, AHN C B, JE J Y. Purification and characterization of antioxidant peptides from enzymatically hydrolyzed ark shell (*Scapharca subcrenata*) [J]. Process Biochem, 2018, 72: 170 - 176.
- [23] BERNARDINI R D, HARNEDY P, BOLTON D, et al. Antioxidant and antimicrobial peptidic hydrolysates from muscle protein sources and by - products [J]. Food Chem, 2011, 124: 1296 - 1307.
- [24] CREUSOT N, GRUPPEN H. Enzyme - induced aggregation and gelation of proteins [J]. Biotechnol Adv, 2007, 25: 597 - 601.
- [25] XIA Y C, BAMDAD F, GÄNZLE M, et al. Fractionation and characterization of antioxidant peptides derived from barley glutelin by enzymatic hydrolysis [J]. Food Chem, 2012, 134(3): 1509 - 1518.
- [26] BAMDAD F, WU J, CHEN L. Effects of enzymatic hydrolysis on molecular structure and antioxidant activity of barley hordein [J/OL]. J Cereal Sci, 2011, 54: 20 - 28.
- [27] ZAYAS J F. Functionality of proteins in food [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997: 1 - 5.
- [28] SHI L F, HAO G X, CHEN J, et al. Nutritional evaluation of Japanese abalone (*Haliotis discus hannai* Ino) muscle: mineral content, amino acid profile and protein digestibility [J/OL]. Food Res Int, 2020, 129: 108876 [2020 - 04 - 19]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996919307628>.
- [29] 胡国宏, 刘英. 利用必需氨基酸指数(EAAI)评价鱼饲料蛋白源[J]. 中国饲料, 1995(15): 29 - 31.
- (上接第33页)
- [11] BAHAROM Z, IDRIS M I, LEE T C, et al. Effects of surfactant concentration on microencapsulated waste vegetable oil [EB/OL]. [2020 - 03 - 25]. <https://doi.org/10.1063/1.5089404>.
- [12] ROJAS V M, DA COSTA BAPTISTA MARCONI L F, GUIMARÃES - INÁCIO A, et al. Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the addition of microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils [J]. Food Chem, 2019, 274: 220 - 227.
- [13] CARVALHO G R, DE BARROS FERNANDES R V, DE CASTRO E SILVA P, et al. Influence of modified starches as wall materials on the properties of spray - dried lemongrass oil [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(11): 4972 - 4981.
- [14] ZHANG S, CHEN J, YIN X, et al. Microencapsulation of tea tree oil by spray - drying with methyl cellulose as the emulsifier and wall material together with chitosan/alginate [J/OL]. J Appl Polym Sci, 2017, 134(13): 44662 [2020 - 04 - 01]. <https://doi.org/10.1002/app.44662>.
- [15] LEE W J, TAN C P, SULAIMAN R, et al. Microencapsulation of red palm oil as an oil - in - water emulsion with supercritical carbon dioxide solution - enhanced dispersion [J]. J Food Eng, 2018, 222: 100 - 109.
- [16] ZHENG H, MAO L, YANG J, et al. Effect of oil content and emulsifier type on the properties and antioxidant activity of sea buckthorn oil - in - water emulsions [J/OL]. J Food Quality, 2020, 2020: 1540925 [2020 - 04 - 01]. <https://www.hindawi.com/journals/jfq/2020/1540925>.
- [17] 白静, 冯彩霞, 赵琳, 等. 乳液稳定性不同检测方法的应用 [J]. 当代化工, 2011(10): 1095 - 1097.
- [18] 邝婉湄, 赵谋明, 赵强忠. 单甘酯对酪蛋白乳浊液稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2012(16): 131 - 133, 137.
- [19] MCBAIN J W, MARTIN H E. XCII. - Studies of the constitution of soap solutions: the alkalinity and degree of hydrolysis of soap solutions [J]. J Chem Soc, Trans, 1914, 105: 957 - 977.
- [20] 杨立志, 赵琳, 罗根祥. 浊度比法测定乳化蜡稳定性研究 [J]. 石油炼制与化工, 2011(8): 93 - 96.