

热处理温度及蛋白浓度对乳清分离 蛋白-黄油乳液体系的影响

李红娟¹, 赵树静¹, 孔宇¹, 于洪梅¹, 李丹²,
李媛², 李洪波¹, 于景华¹

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 妙可蓝多(天津)食品科技有限公司, 天津 300462)

摘要:稳定的乳清分离蛋白(WPI)-黄油乳液体系在乳制品加工及乳制品营养传递系统中有良好的应用前景。对不同质量分数(2%、4%、6%、8%)的WPI分别进行不同的热处理(未加热、80℃和90℃),加入黄油并进行超声波处理,制备成乳液,对乳液体系粒径、絮凝指数(FI)、乳化活性(EA)、乳化稳定性(ES)、物理稳定性、储藏期粒径变化和脂肪上浮情况进行分析。结果表明:随着热处理温度的升高,乳液的平均粒径增大,未加热乳液平均粒径均小于1 μm,经加热处理后,不同蛋白质量分数乳液的粒径均有不同程度的增大;经过热处理,乳液的EA和ES均有所改善;随着蛋白质量分数的增大,乳液的物理稳定性提高,其中WPI质量分数为6%和8%时,90℃热处理样品的稳定性指数(TSI)均小于0.6,稳定性最好,同一蛋白质量分数下,热处理温度越高,蛋白对乳液的稳定作用越强;乳液储藏期脂肪上浮情况与热处理温度和蛋白质量分数显著相关,较高的蛋白质量分数及热处理温度能够改善乳液体系中脂肪上浮情况。研究表明,通过控制蛋白质量分数和WPI热处理温度可以有效提高WPI-黄油乳液体系的乳化特性及稳定性。

关键词:乳清分离蛋白;热处理;乳液;稳定性

中图分类号:TS252.4;TQ93 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)07-0034-07

Effect of heat treatment temperature and protein concentration on whey protein isolate - butter emulsion system

LI Hongjuan¹, ZHAO Shujing¹, KONG Yu¹, YU Hongmei¹, LI Dan²,
LI Yuan², LI Hongbo¹, YU Jinghua¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Miao Ke Landuo (Tianjin) Food Technology Co., Ltd., Tianjin 300462, China)

Abstract: The stable whey protein isolate (WPI) - butter emulsion system has a good application prospect in dairy product processing and dairy product nutrition delivery system. WPI with different mass concentrations (2%, 4%, 6%, 8%) were subjected to different heat treatments (unheated, 80 °C, 90 °C), then butter was added and ultrasonic treatment was performed to prepare emulsions. The particle size, flocculation index (FI), emulsifying activity (EA), emulsion stability (ES), physical stability, particle size changes and fat floating of the emulsion during storage were analyzed. The results showed

that as the heat treatment temperature increasing, the average particle size of the emulsion increased. The average particle size of the unheated emulsion was less than 1 μm, After heat treatment, the particle size of the emulsion with different protein mass concentration increased at different degrees. After heat treatment, the EA and ES of the WPI emulsion improved. As the

收稿日期:2020-09-09;修回日期:2021-04-11

基金项目:国家重点研发计划(2017YFE0131800);天津市教育科学“十三五”规划课题青年专项(HEYP5015)

作者简介:李红娟(1987),女,讲师,博士,研究方向为乳品科学与工程(E-mail) lihongjuan@tust.edu.cn。

通信作者:于景华,教授,博士(E-mail) yujinghua@tust.edu.cn。

protein mass concentration increased, the physical stability of emulsion increased, in which the stability indexes of the samples with protein mass concentration 6% and 8% heated at 90 °C were all less than 0.6, and the stability was the best. Under the same protein mass concentration, the higher the heat treatment temperature, the stronger the protein's stabilizing effect on the emulsion. The fat floating of the emulsion during storage was significantly related to the heat treatment temperature and protein mass concentration. Higher protein mass concentration and heat treatment temperature could improve the fat floating in the emulsion system. The study showed that controlling the protein mass concentration and WPI heat treatment temperature could effectively improve the emulsification characteristics and stability of the WPI - butter emulsion system.

Key words: whey protein isolate; heat treatment; emulsion; stability

乳液是由两种互不相溶的液体通过乳化作用均匀分散形成,乳液体系的稳定性在科学研究和工业应用中都极为重要。乳液体系稳定性的调控可以通过添加小分子表面活性剂从而降低界面张力实现^[1],也可以添加大分子的蛋白质或者多糖,这些大分子能够在体系中形成弹性膜结构,同时能够降低界面张力^[2]。

乳清蛋白是干酪加工过程中的副产物,具有良好的功能特性,如较好的热稳定性、乳化性、起泡性和溶解性,在食品行业乃至生物医药等领域都具有重要应用^[3]。乳清蛋白具有亲水性,在均质过程中可以吸附并扩散到油/水界面,在食品乳液的制备中得到了广泛应用^[4-5]。研究发现,乳清蛋白可以与水包油或油包水型乳液稳定结合^[6],其中加热诱导的乳清蛋白微粒和由此制备形成的乳液或乳液凝胶成为近年来的研究热点^[7]。

热诱导的乳清蛋白聚合微粒主要由加热过程中巯基和二硫键等分子间作用力形成。 β -乳球蛋白受热变性之后暴露出巯基,发生聚合,形成 β -乳球蛋白聚集体。同时,热变性的 α -乳白蛋白会暴露出分子内部的二硫键,与 β -乳球蛋白的巯基发生相互作用形成聚集体,从而形成乳清蛋白热聚集颗粒^[8-9]。乳清蛋白热聚集颗粒可以作为乳化剂在食品乳液体系中使用。与传统的乳化剂相比,蛋白颗粒乳化剂具有许多潜在的优点,其中较高的抗聚结性是蛋白颗粒乳化剂的主要优点。当乳清蛋白热聚集颗粒作为乳化剂时,能够在乳液液滴外围形成一层固体颗粒,在空间上妨碍了不同乳液液滴的靠近,从而提供了一个强大的聚结屏障,这比使用低相对分子质量化合物稳定乳液更加有效^[10]。因此,探究热诱导乳清蛋白稳定乳液的特性具有重要意义。

乳清分离蛋白(WPI)、黄油均为乳品加工中的常用原、配料,将WPI和黄油通过处理制备稳定的

乳液体系能够在乳品加工如乳饮料、冰淇淋、酸奶及奶粉中起到重要作用,具有良好的应用前景。本课题系统性地研究不同蛋白质量分数及热处理温度对WPI-黄油乳液体系稳定性的影响。通过加热、均质及超声处理制备不同的乳液,研究不同热处理温度及蛋白质量分数对乳液粒径、絮凝指数(FI)、乳化活性(EA)、乳化稳定性(ES)、物理稳定性、储藏期粒径变化和脂肪上浮情况的影响,探究热处理WPI-黄油乳液稳定性影响因素。

1 材料与方法

1.1 试验材料

乳清分离蛋白(WPI 9410 食品级,蛋白质含量89%(湿基),脂肪含量1%(湿基)),美国Hilmar公司;无水黄油(食品级),内蒙古华琳食品有限责任公司;盐酸(分析纯),天津欧密科化学试剂有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS,分析纯),Genview公司。

BSA124S型电子天平,赛多利斯科学仪器北京有限公司;HWS24型电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;FJ200-SH型数显高速分散均质机,上海标本模型厂;JY92-II DN型超声波细胞破碎仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;1541-TL-1917 Turbiscan型稳定性分析仪,法国Formulation公司;Bettersize2600型激光粒度分析仪,丹东百特仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 不同质量分数WPI的热处理

按质量分数分别为2%、4%、6%、8%准确称取不同质量的WPI溶于去离子水中,55 °C水合30 min。水合后,将蛋白溶液冷却至室温,用1 mol/L HCl调节溶液pH至7.0。然后将蛋白溶液于不同温度(80 °C和90 °C)下水浴加热30 min。热处理结束后立即冰浴冷却至室温,并以未加热处理的蛋白

溶液为对照。

1.2.2 WPI-黄油乳液的制备

将 WPI 溶液水浴加热到 50 °C, 分别按油相和水相质量比 1:10 添加黄油(黄油预先加热呈液态), 先用高速分散均质机在 10 000 r/min 条件下均质处理 9 min, 再用超声波细胞破碎仪进行超声破碎处理, 条件设置为功率 450 W, 超声时间 3 s, 间隙时间 3 s, 总时长 20 min。超声结束后, 4 °C 保存备用。

1.2.3 乳液粒径的测定

乳液粒径用激光粒度分析仪测定, 参照 Lu 等^[11]的方法略作改动。用质量分数 1% SDS 作为分散剂, 添加量为每 10 mL 乳液 0.1 mL 分散剂。乳液样品颗粒的折射率为 1.46, 水的折射率为 1.33^[12]。加入样品使遮光率在 10% ~ 15% 之间, 每个样品自动测量 3 次, 取平均值。使用面积平均径($d_{3,2}$)和体积平均径($d_{4,3}$)对乳液粒径进行表征。

1.2.4 乳液絮凝指数的测定

乳液的絮凝指数(FI)是指乳液中的油滴依靠作用力聚集在一起甚至形成絮凝团的过程。根据 Castellani 等^[13]的方法测定乳液的 FI。将乳液置于室温(18 °C)下保存 4 h, 按 1.2.3 方法分别测定乳液在水和 1% SDS 中的粒径, 按下式计算 FI。

$$I_F = (d_{4,3}^1/d_{4,3}^2 - 1) \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_F 为 FI 值; $d_{4,3}^1$ 为乳液在水中的粒径; $d_{4,3}^2$ 为乳液在 1% SDS 中的粒径。

1.2.5 乳液乳化活性和乳化稳定性的测定

参照 Pearce 等^[14]的方法, 略作改动, 通过乳化活性(EA)和乳化稳定性(ES)表征乳液的乳化性能。EA 是用来衡量蛋白质被吸附到界面的能力, ES 是指在限定时间内吸附层的稳定性^[15-16]。分别于 0 min 和 10 min 取 50 μ L 制备的乳液, 再用质量分数 0.1% SDS 溶液稀释定容至 5 mL, 混匀, 消除气泡后于 500 nm 处测定样品的吸光值。以质量分数 0.1% SDS 溶液为空白对照。其中样品在 0 min 的吸光值(A_0)用来表示 EA, 样品的 ES 按下式计算。

$$I_s = \frac{A_0 \times 10}{A_0 - A_{10}} \quad (2)$$

式中: I_s 为乳液乳化稳定性, min; A_{10} 为将乳液静置 10 min 后所测得的吸光值;10 为 2 次测定的时间间隔, 即 10 min。

1.2.6 乳液物理稳定性的测定

WPI-黄油乳液体系的物理稳定性由乳液体系的稳定性指数(TSI)来表征, 使用稳定性分析仪对样品进行自上而下式的垂直扫描, 通过背散射光的

强度和透射光来监控乳液体系的动态变化。将乳液样品加入稳定性分析仪专用玻璃瓶中, 温度设定为 25 °C, 每 30 min 扫描 1 次, 扫描 8 次, 记录样品扫描图谱, 重复测定 3 次, 取平均值。

1.2.7 乳液储藏期粒径变化和脂肪上浮情况的测定

参照 1.2.3 分别测定样品在不同储藏期的体积平均径($d_{4,3}$)。

将制备好的乳液盛放在试管中, 储藏于 25 °C 条件下, 分别在 0、14、30 d 观察样品的脂肪上浮情况并拍照。

1.2.8 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行处理和显著性分析。结果以“ $\bar{x} \pm s$ ”表示。采用单因素方差分析分析组间差异性, 以 $P < 0.05$ 表示差异显著。使用软件 Origin8.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液粒径的影响

表 1 为热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液 $d_{3,2}$ 的影响。由表 1 可知, 蛋白质热处理对乳液粒径有显著影响。未加热的乳液粒径较小(小于 1 μ m), 经过热处理后, 不同质量分数 WPI 的乳液粒径均有不同程度的增大。

表 1 热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液 $d_{3,2}$ 的影响

热处理温度/°C	质量分数/%	$d_{3,2}/\mu\text{m}$
未加热	2	0.893 ± 0.020
	4	0.866 ± 0.025
	6	0.769 ± 0.023
	8	0.957 ± 0.134
80	2	1.032 ± 0.035
	4	0.970 ± 0.039
	6	1.581 ± 0.040
	8	1.549 ± 0.040
90	2	1.641 ± 0.045
	4	1.916 ± 0.049
	6	2.259 ± 0.053
	8	4.891 ± 0.266

图 1 为不同质量分数 WPI(2% ~ 8%) 未加热及加热(80、90 °C)的乳液粒径($d_{4,3}$)分布图。由图 1 可知, 乳液粒径曲线呈双峰分布, 第 1 个峰粒径在 0.21 ~ 2.22 μ m, 第 2 个峰分布范围较大, 在 2.22 ~ 23.4 μ m 之间。

乳液粒径增加一方面是由于热处理温度升高, WPI 变性程度增加, 暴露出更多的疏水基团, 在形成

乳液过程中,包裹在脂肪外面的 WPI 聚集程度升高,导致粒径增加;另一方面是形成乳液后,不同乳液液滴之间的 WPI 由于疏水作用并伴随氢键和二硫键的作用结合形成聚集体^[17]。图 1 中第 1 个峰粒径较小,可能是加热过程中 WPI 形成的聚集体,在乳化过程中未参与乳液形成。第 2 个峰主要体现乳液粒径,随热处理温度升高,乳液粒径分布曲线向较大的粒径方向移动。

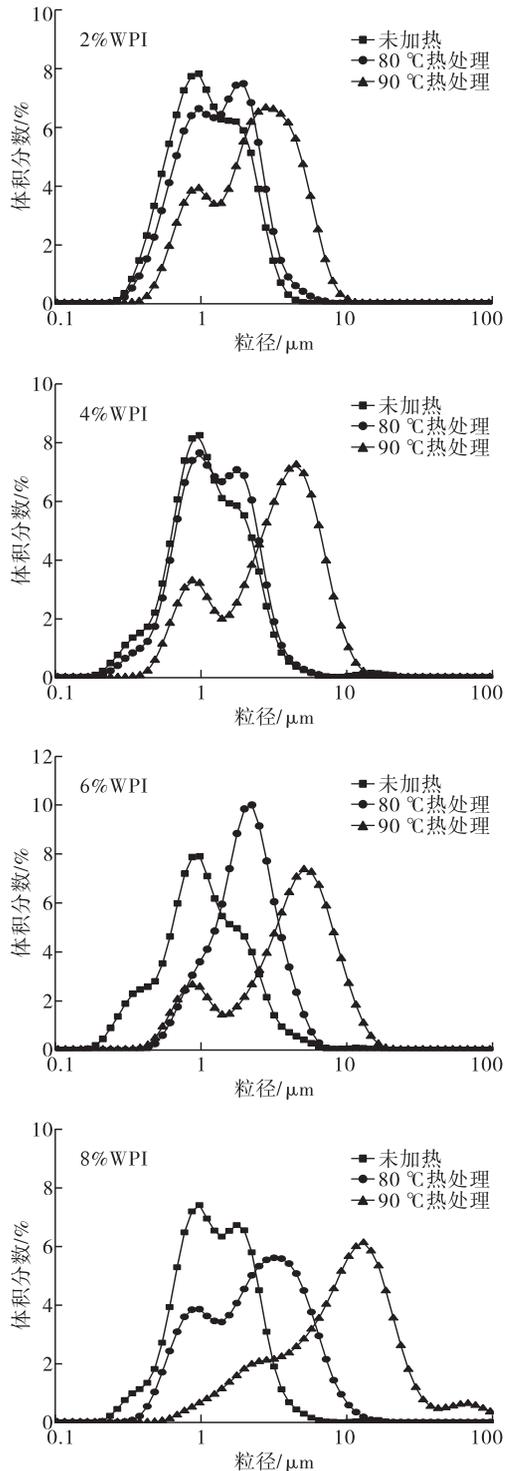


图 1 不同热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI - 黄油乳液粒径 ($d_{4,3}$) 分布的影响

2.2 热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI - 黄油乳液絮凝状态的影响

FI 是 WPI - 黄油乳液中蛋白聚集状态的最直接表现,表 2 为热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI - 黄油乳液 FI 的影响。

表 2 热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI - 黄油乳液絮凝指数 (FI) 的影响

热处理温度/°C	质量分数/%	FI/%
未加热	2	0.84 ± 0.01
	4	19.22 ± 0.03
	6	27.84 ± 0.02
	8	11.70 ± 0.03
80	2	11.86 ± 0.02
	4	10.84 ± 0.02
	6	14.63 ± 0.01
	8	137.42 ± 0.03
90	2	47.72 ± 0.03
	4	37.14 ± 0.02
	6	247.63 ± 0.01
	8	873.45 ± 0.01

从表 2 可以看出:未热处理的样品,当 WPI 质量分数从 2% 增加至 6% 时,FI 从 0.84% 逐渐增加至 27.84%,当 WPI 质量分数继续增加到 8% 时,FI 逐渐减小到 11.70%;对样品进行 80 °C 热处理时,当 WPI 质量分数从 2% 增加至 4% 时,FI 略有降低,从 4% 增加至 8% 时,FI 从 10.84% 逐渐增加至 137.42%;对样品进行 90 °C 热处理时,当 WPI 质量分数从 2% 增加至 4% 时,FI 略有降低,从 4% 增加至 8% 时,FI 从 37.14% 逐渐增加至 873.45%。结果表明,在相同的 WPI 质量分数时,WPI - 黄油乳液的 FI 随着热处理温度升高整体显著增加。热处理和高速剪切过程的共同作用促进疏水基团的暴露^[18],蛋白质之间的疏水作用增强,液滴絮凝程度增加,导致乳液粒径增大,此结果同 2.1 粒径测定结果一致。

2.3 热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI - 黄油乳液乳化活性 (EA) 和乳化稳定性 (ES) 的影响

图 2 为不同热处理温度和 WPI 质量分数下 WPI - 黄油乳液的 EA。由图 2 可知,当 WPI 质量分数为 2% ~ 6% 时,不同热处理温度下的 WPI - 黄油乳液 EA 值差异不显著,当 WPI 质量分数为 8% 时,经过 80 °C 和 90 °C 热处理,WPI - 黄油乳液 EA 值显著提高。WPI 在较高的浓度和加热温度下,蛋白质颗粒发生热聚集,表面疏水性提高,对脂肪的包埋能力提高,因此乳化能力增强。Monahan 等^[19]研究发现,蛋白质的 EA 由其表面疏水性(疏水性影响蛋白

质对油水界面的亲和性)及分子灵活性(分子灵活性影响蛋白质结构展开及与其他蛋白质相互作用)所决定。而经过热处理的蛋白质疏水性和分子灵活性都显著上升^[20]。

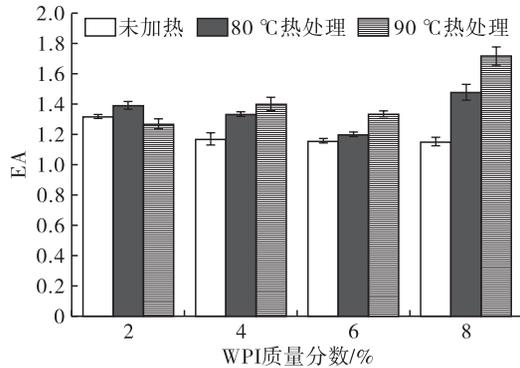


图2 不同热处理温度和 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液乳化活性的影响

图3为不同热处理温度和WPI质量分数下WPI-黄油乳液的ES。由图3可知,对不同质量分数的WPI进行加热处理,WPI-黄油乳液的ES均有不同程度的改善。未加热、80 °C和90 °C热处理的WPI-黄油乳液的ES最大值分别为1 931.0、2 932.0 min和3 180.0 min,其中2%的WPI经过90 °C热处理后WPI-黄油乳液的ES最大,约为同等质量分数下未加热乳液的3倍。当热处理温度为90 °C时,WPI-黄油乳液的ES随着WPI质量分数的增大而减小。90 °C时WPI变性程度增加,因WPI质量分数增大导致的疏水基团暴露增加,其乳化稳定性(ES)显著降低。

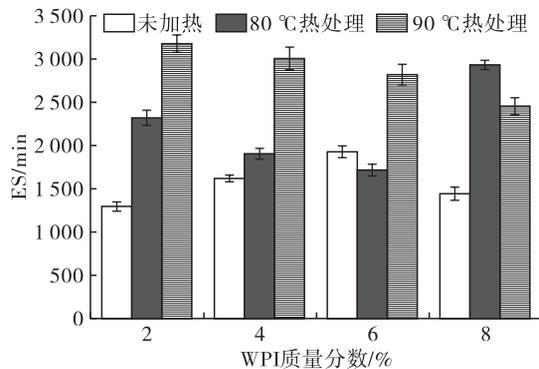


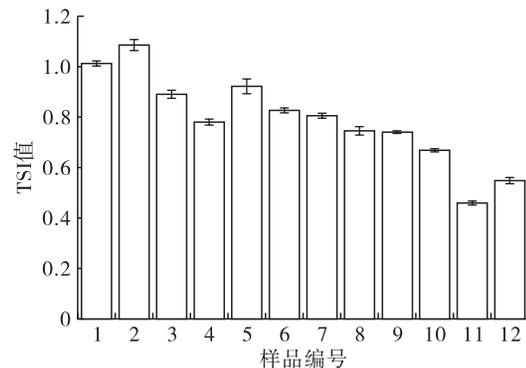
图3 不同热处理温度和 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液乳化稳定性的影响

2.4 热处理温度及 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液物理稳定性的影响

TSI反映的是样品在整个时间内质量浓度和粒径变化的总体情况,变化幅度越大,TSI值就越大,体系就越不稳定。图4为不同热处理温度和WPI质量分数下WPI-黄油乳液的TSI值。由图4可知:与未加热样品比较,相同WPI质量分数下,经加

热处理后的样品(5~12号样品)TSI值减小,其中11号(WPI质量分数为6%,90 °C加热处理)和12号样品(WPI质量分数为8%,90 °C加热处理)对应的TSI值均小于0.6,稳定性最好;总体上,随着WPI质量分数的增大和热处理温度的升高,经热处理后样品的TSI值逐渐降低,说明蛋白质量分数增加和热处理温度的升高能够提高乳液稳定性,其中90 °C热处理样品的TSI值降低更加明显,样品更加稳定。

Segall等^[21]指出,低蛋白质量浓度的乳液易发生二次蛋白吸附,蛋白易从连续相迁移到油水界面。这与试验结果中2% WPI质量分数乳液的稳定性较低一致。受热程度高的WPI可以在油滴上形成更强的蛋白膜,从而增强乳液的稳定性。



注:样品1~4为未加热不同蛋白质量分数(2%~8%)的WPI-黄油乳液;样品5~8为80 °C加热不同蛋白质量分数(2%~8%)的WPI-黄油乳液;样品9~12为90 °C加热不同蛋白质量分数(2%~8%)的WPI-黄油乳液。下同

图4 不同热处理温度和 WPI 质量分数对 WPI-黄油乳液物理稳定性的影响

2.5 乳液储藏期粒径变化和脂肪上浮情况

乳液储藏期粒径变化和脂肪上浮情况能更具体、直观地反映乳液在储藏期的变化。图5、图6分别为不同热处理温度和WPI质量分数下的WPI-黄油乳液的 $d_{4,3}$ 和脂肪上浮随储藏时间的变化情况。

从图5可以看出,各质量分数下WPI-黄油乳液粒径随储藏时间发生一定的变化。未加热组乳液的粒径随储藏时间的延长而逐渐减小。这可能由于未加热的乳液在储藏期油滴逐渐上浮,导致粒径变小。经过80 °C热处理乳液的粒径在储藏期变化较小,表明其具有良好的储藏稳定性。90 °C热处理的样品经历了粒径先减小后增大的过程,说明在储藏后期乳液颗粒开始凝聚,导致乳液粒径增大。由图6可知,随着储藏时间的延长,未加热乳液开始出现脂肪上浮现象,且较为严重,80 °C热处理的样品略有上浮,90 °C热处理的样品视觉上没有出现脂肪上

浮情况,说明其储藏稳定性较高;同样,在相同的热处理温度下,低蛋白浓度样品脂肪上浮显著增加,说明提高蛋白浓度对乳液的储藏稳定性有积极影响。

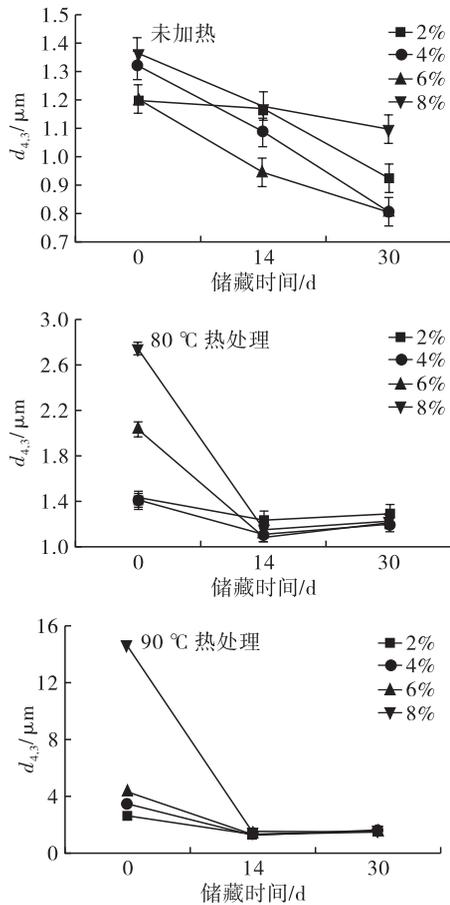


图5 不同热处理温度和 WPI 质量分数下的 WPI - 黄油乳液的粒径 ($d_{4,3}$) 随储藏时间的变化情况

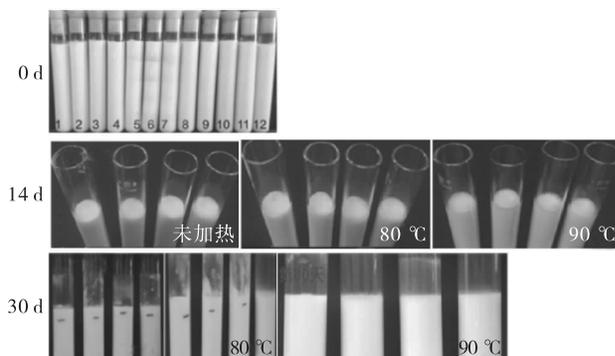


图6 不同热处理温度和 WPI 质量分数下的 WPI - 黄油乳液的脂肪上浮随储藏时间的变化情况

3 结论

本文主要通过对 WPI 进行不同温度的加热处理,制备不同蛋白质量分数的 WPI - 黄油乳液,研究了乳液体系的特征指标。结果表明:随着热处理温度的升高,乳液的平均粒径也随着增大;热处理 WPI 提高了乳液的乳化活性和乳化稳定性,8% 蛋白质量分数、90 °C 热处理乳液的乳化活性最高,为 1.7。随

着蛋白质量分数的增大,乳液物理稳定性提高,同一蛋白质量分数下,热处理温度越高,乳液的 TSI 值越小,稳定性越好。乳液储藏期脂肪上浮情况与热处理温度和蛋白质量分数有很大的关系,热处理温度高的乳液体系,脂肪上浮不明显。

本研究采用的 WPI、黄油是乳品加工中的常用原、配料,WPI - 黄油乳液体系可广泛应用于乳饮料、冰淇淋及酸奶等乳品加工中,作为稳定水、油两相的手段,具有良好的应用前景。经过较高的热处理温度的 WPI 具有更好的乳化活性和乳化稳定性,因此在乳制品加工过程中,可以对部分原料 WPI 进行加热处理,然后进行均质及乳化工艺,能够对乳液体系稳定性起到良好的改善作用。体系中蛋白质浓度越高,其乳化能力越强,但是同时其乳液粒径及絮凝指数也增加。因此,在实际使用时,应根据具体加工产品及体系选择合适的蛋白浓度。

参考文献:

- [1] ZHENG L, CAO C, CHEN Z, et al. Evaluation of emulsion stability by monitoring the interaction between droplets [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 132: 109804 [2020 - 09 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109804>.
- [2] ZHU L J, XU Q Y, LIU X Y, et al. Soy glycinin - soyasaponin mixtures at oil - water interface: interfacial behavior and O/W emulsion stability [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 327:127062 [2020 - 09 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127062>.
- [3] 刘永峰, 张薇, 刘婷婷, 等. 乳蛋白中乳清蛋白与酪蛋白组成、特性及应用的研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(23): 1 - 6.
- [4] LEMAN J, KINSELLA J E. Surface activity, film formation, and emulsifying properties of milk proteins [J]. *Crit Rev Food Sci*, 1989, 28(2): 115 - 138.
- [5] DICKINSON E. Milk protein interfacial layers and the relationship to emulsion stability and rheology [J]. *Colloid Surface B*, 2001, 20(3): 197 - 210.
- [6] WU J D, SHI M X, LI W, et al. Pickering emulsions stabilized by whey protein nanoparticles prepared by thermal cross - linking [J]. *Colloid Surface B*, 2015, 127: 96 - 104.
- [7] XIAO J, LI Y Q, HUANG Q R. Recent advances on food - grade particles stabilized Pickering emulsions: fabrication, characterization and research trends [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2016, 55: 48 - 60.
- [8] 赵焜, 李向莹, 秦于思, 等. 热处理对 α - 乳白蛋白变性及与其他乳蛋白相互作用影响的研究进展 [J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 260 - 265.

- [9] FRYDENBERG R P, HAMMERSHOJ M, ANDERSEN U, et al. Protein denaturation of whey protein isolates (WPIs) induced by high intensity ultrasound during heat gelation [J]. *Food Chem*, 2016, 192:415 – 423.
- [10] BINKS B P, WHITBY C P. Nanoparticle silica – stabilised oil – in – water emulsions: improving emulsion stability [J]. *Colloid Surface A*, 2005, 253 (1/2/3): 105 – 115.
- [11] LU J, ARGOV – ARGAMAN N, ANGGREK J, et al. The protein and lipid composition of the membrane of milk fat globules depends on their size [J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99(6): 4726 – 4738.
- [12] SCHMIDMEIER C, O' GORMAN C, DRAPALA K P, et al. Elucidation of factors responsible for formation of white flecks in reconstituted fat filled milk powders [J]. *Colloid Surface A*, 2019, 575:245 – 255.
- [13] CASTELLANI O, BELHOMME C, DAVID – BRIAND E, et al. Oil – in – water emulsion properties and interfacial characteristics of hen egg yolk phospholipids [J]. *Food Hydrocolloid*, 2006, 20(1): 35 – 43.
- [14] PEARCE K N, KINSELLA J E. Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique [J]. *J Agric Food Chem*, 1978, 26(3): 716 – 723.
- [15] STONE A K, KARALASH A, TYLER R T, et al. Functional attributes of pea protein isolates prepared using different extraction methods and cultivars [J]. *Food Res Int*, 2015, 76:31 – 38.
- [16] MU T H, TAN S S, XUE Y L. The amino acid composition, solubility and emulsifying properties of sweet potato protein [J]. *Food Chem*, 2009, 112(4): 1002 – 1005.
- [17] SOURDET S, RELKIN P, CÉSAR B. Effects of milk protein type and pre – heating on physical stability of whipped and frozen emulsions [J]. *Colloid Surface B*, 2003, 31(1): 55 – 64.
- [18] DISSANAYAKE M, VASILJEVIC T. Functional properties of whey proteins affected by heat treatment and hydrodynamic high – pressure shearing [J]. *J Dairy Sci*, 2009, 92(4): 1387 – 1397.
- [19] MONAHAN F J, MCCLEMENTS D J, KINSELLA J E. Polymerization of whey proteins in whey protein – stabilized emulsions [J]. *J Agric Food Chem*, 1993, 41 (11): 1826 – 1829.
- [20] KIM D A, CORNEC M, NARSIMHAN G. Effect of thermal treatment on interfacial properties of β – lactoglobulin [J]. *J Colloid Inter Sci*, 2005, 285 (1): 100 – 109.
- [21] SEGALL K I, GOFF H D. Secondary adsorption of milk proteins from the continuous phase to the oil – water interface in dairy emulsions [J]. *Int Dairy J*, 2002, 12 (11): 889 – 897.
-
- (上接第 33 页)
- [9] LI J L, QIAO Z H, TATSUMI E, et al. A novel approach to improving the quality of bitter – solidified tofu by W/O controlled – release coagulant. 1: preparation of W/O bitter coagulant and its controlled – release property [J]. *Food Bioprocess Tech*, 2013, 6(7):1790 – 1800.
- [10] FOUDAZI R, QAVI S, MASALOVA I, et al. Physical chemistry of highly concentrated emulsions [J]. *Adv Colloid Interface*, 2015, 220:78 – 91.
- [11] KIM H S, MASON T G. Advances and challenges in the rheology of concentrated emulsions and nanoemulsions [J]. *Adv Colloid Interface*, 2017, 247: 397 – 412.
- [12] 胡起华, 马传国, 陈小威, 等. 乙基纤维素油凝胶及其在食品中应用的研究进展 [J]. *中国油脂*, 2020, 45 (1): 115 – 120.
- [13] CHEN X W, YANG X Q. Characterization of orange oil powders and oleogels fabricated from emulsion templates stabilized solely by a natural triterpene saponin [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(9): 2637 – 2646.
- [14] CHEN X W, SUN S D, MA C G, et al. Oil – water interfacial – directed spontaneous self – assembly of natural *Quillaja* saponin for controlling interface permeability in colloidal emulsions [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(47): 13854 – 13862.
- [15] MCCLEMENTS D J, RAO J. Food – grade nanoemulsions: formulation, fabrication, properties, performance, biological fate, and potential toxicity [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2011, 51(4):285 – 330.
- [16] NIKIFORIDIS C V, SCHOLTEN E. High internal phase emulsion gels (HIPE – gels) created through assembly of natural oil bodies [J]. *Food Hydrocolloid*, 2015, 43: 283 – 289.
- [17] WAN Z L, SUN Y E, MA L L, et al. Thermoresponsive structured emulsions based on the fibrillar self – assembly of natural saponin glycyrrhizic acid [J]. *Food Funct*, 2017, 8(1): 75 – 85.
- [18] DICKINSON E, MERINO L M. Effect of sugars on the rheological properties of acid caseinate – stabilized emulsion gels [J]. *Food Hydrocolloid*, 2002, 16(4):321 – 331.
- [19] FERRY J D. *Viscoelastic properties of polymers* [M]. 3rd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 1980: 328 – 342.
- [20] CLARK A H, ROSS – MURPHY S B. *Structural and mechanical properties of biopolymer gels* [M]. Berlin: Springer, 1987: 57 – 192.