

大豆分离蛋白-花青素复合乳液稳定性研究

朱颖 赵思明 安然 张雪娜 王中江 江连洲

(东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 以大豆分离蛋白和花青素为原料,制备热处理大豆分离蛋白-花青素复合乳液,研究添加花青素对复合乳液特性的影响规律。利用动态光散射从宏观角度评价花青素复合对复合乳液粒径大小以及分布上的影响,采用乳化稳定性、乳层析指数和 ζ -电位分析,分别从不同的角度评价复合乳液的稳定性,结果表明:花青素复合后,复合乳液的粒径变小,乳层析指数显著降低, ζ -电位的绝对值增加,说明乳液液滴间的静电斥力大,不易发生聚集。蛋白与花青素的质量比为40的样品具有最低的CI值(41%)和最大的电位绝对值,说明在所有花青素复合的热处理SPI-花青素复合乳液中,其具有最好的乳液稳定性。氧化稳定性实验结果表明:随着花青素浓度的增加,乳液DPPH自由基和ABTS $\cdot^+$ 清除率先上升后略有下降,其中蛋白与花青素的质量比为40时,乳液抗氧化性最佳。因此在大豆分离蛋白中添加花青素可以有效提高复合乳液氧化稳定性。

关键词: 大豆分离蛋白; 花青素; 复合乳液; 乳液稳定性; 氧化稳定性

中图分类号: TS214.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0330-06

Stability of Anthocyanin – Soybean Protein Isolate Reconstituted Emulsion

ZHU Ying ZHAO Siming AN Ran ZHANG Xuena WANG Zhongjiang JIANG Lianzhou

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The reconstituted emulsion prepared by soybean protein isolate and anthocyanin was studied. Dynamic light scattering (DLS) was used to evaluate the effect of anthocyanin on the size and distribution of reconstituted emulsion. And the stability of reconstituted emulsion was evaluated by emulsion stability and Zeta potential analysis. The results showed that the particle size of the reconstituted emulsion became smaller, the stability of emulsion was decreased significantly, and the absolute value of ζ -potential was increased. The sample of 40 (mass ratio of SPI by heat treatment to anthocyanin) had the lowest CI value (41%) and the maximum ζ -potential, which indicated that the reconstituted emulsion with certain amount of anthocyanins had the best stability. At the same time, the stability of emulsion oxidation showed that the scavenging ability of DPPH and ABTS was increased first and then decreased slightly with the increase of concentration of anthocyanin. And the reconstituted ratio of SPI by heat treatment to anthocyanin was 40, the antioxidant property of emulsion was the best. Therefore, the addition of anthocyanin could effectively improve the oxidation stability of the reconstituted emulsion.

Key words: soybean protein isolates; anthocyanins; reconstituted emulsion; stability of emulsion; oxidation stability

0 引言

大豆分离蛋白(SPI)作为一种营养价值丰富的食用蛋白资源,因其较高的蛋白含量以及优良的功能特性,如凝胶性、乳化性、起泡性及持水性等,而被

广泛应用于食品加工中^[1-3]。食品加工过程中,热杀菌、改性等环节都会采用热处理这一处理手段^[4]。热处理具有杀菌、抑制酶活性、改善食品感官品质等功能,但过度加热也会破坏热敏性营养成分(如维生素),使感官品质劣化。此外,热处理可

收稿日期: 2018-09-24 修回日期: 2018-10-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31671807、31571876)和国家重点研发计划项目(2016YFD0400700、2016YFD0400402)

作者简介: 朱颖(1992—),女,博士生,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: 13258512068@163.com

通信作者: 江连洲(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: jlzname@163.com

显著影响蛋白质的结构,适当的热处理能使蛋白变性,增强蛋白质水解度。热处理导致蛋白质的伸展,表面疏水性增加,二硫键交联形成聚集体,同时会暴露一些疏水基团参与聚集体的形成^[5]。

花青素作为一种黄酮类含量丰富、广泛应用于食品中的植物色素,其可清除 DPPH 自由基,具有很强的抗氧化作用^[6],可延缓衰老。此外花青素还具有抑菌、预防癌症、抗心血管疾病等多种功能^[7-9]。花青素是一种小分子活性物质,具有较强的蛋白亲和性,可通过渗入到蛋白微原纤间,与多肽链形成多种交联点^[10]。

近年来,蛋白与多酚间的研究主要集中在二者的结合机理及二者复合后对蛋白结构和功能性质的影响等方面。HE 等^[11]研究发现, β -乳球蛋白和锦葵花素葡萄糖苷通过疏水相互作用发生结合,导致蛋白质二级结构发生变化。KANAKIS 等^[12]采用分子模拟的方法发现,茶多酚和乳球蛋白通过疏水相互作用结合。PRIGENT 等^[13]使用等温滴定量热法研究牛血清白蛋白(BSA)与原花青素的作用机理发现,二者通过氢键发生结合。JIA 等^[14]在碱性条件下研究乳清蛋白和表儿茶素的相互作用,发现表儿茶素的加入改变了乳清蛋白的二级、三级结构,且蛋白的起泡性和乳化性均得到改善。

本文研究 SPI-花青素复合溶液在热处理条件下其复合乳化体系的功能性质、界面性质、理化性质及微观结构的表征,利用动态光散射、乳化稳定性等宏观指标,明确 SPI 与花青素间的互作关系对乳液性质的影响规律;同时通过氧化稳定性实验,探究花青素浓度对复合乳液氧化稳定性的影响,进一步探讨花青素对大豆分离蛋白理化性质的影响,为开发新的大豆蛋白产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白,实验室自制;花青素(质量分数为 25%)购自陕西天之润生物科技有限公司,进一步经过固相萃取分离纯化,除去蛋白质、多糖、有机酸和酚类物质,得到的花青素纯化物质质量分数提高到 35%;盐酸、氢氧化钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠,北京新光化工试剂厂;正己烷、乙酸乙酯、甲醇,天津北科化学品有限责任公司;其他化学试剂均为分析纯试剂。

1.2 仪器与设备

GL-20G-II 型高速冷冻离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;FD5-3 型冷冻干燥机,美国 SIM 公司;PHSJ-4A 型实验室 pH 计,上海仪电科学

仪器股份有限公司;电子分析天平(0.0001 g),北京赛多利斯仪器系统有限公司;ULTRA-TURRAX UTL2000 型乳化机,德国 IKA 仪器设备公司;F-4500 型荧光分光光度计,日本 HITACHI 公司;TU-1800 型紫外可见分光光度计,郑州飞旭光谱仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 大豆分离蛋白制备

参考 MEINLSCHMIDT 等^[15]的方法。将新鲜大豆碾碎成粉后,与正己烷按照液料比 3 mL/g 的比例混合,室温(20℃)下搅拌 2 h 进行 3 次脱脂。将脱脂豆粉与去离子水按照液料比 10 mL/g 混合后,用 NaOH(2 mol/L)将溶液的 pH 值调节至 8.5,室温下搅拌 2 h 后,溶液 9 000 g 离心 20 min,取上清液用 HCl(2 mol/L)将溶液 pH 值调节至 4.5。溶液静置 2 h 后 6 000 g 离心 20 min 得到蛋白沉淀,最后将蛋白沉淀溶于去离子水,用 NaOH(2 mol/L)将蛋白质 pH 值调节至 7.0。将蛋白溶液冷冻干燥后得粉末状大豆分离蛋白。

1.3.2 花青素提纯

参照 SUI 等^[16]的方法,将富含花青素的黑米提取物粉末溶于去离子水,使用固相萃取技术去除黑米提取物中杂质。具体纯化步骤为,首先用 2 倍体积的酸化水去除不溶性成分,如糖、酸等,然后用 2 倍体积的乙酸乙酯去除多酚类化合物,如酚酸、黄酮等,最后用甲醇洗脱吸附在吸附柱上的花青素。使用旋转蒸发器在 40℃ 条件下除去甲醇,即可得纯化后的花青素,在 -20℃ 条件下贮存,直至使用。在 280 nm 处使用高效液相色谱法检测花青素的纯度。

1.3.3 大豆蛋白-花青素乳液制备

取 30 mL 的 85℃ 热处理 SPI 溶液(0.1%),按照蛋白与花青素质量比 100、80、60、40、20 加入花青素,室温下磁力搅拌 30 min 后,加入 10 mL 牡丹籽油充分混合均匀,并加入 0.2 mg/mL 叠氮钠防止溶液变质。使用高速剪切法制备乳液,将溶液在均质机上以 16 000 r/min 的转速分散 2 min,且每隔 30 s 停顿一次。将未加花青素的乳液记为 0 号样品,按照蛋白与花青素的质量比从大到小依次将乳液记为 1、2、3、4、5 号样品。

1.3.4 乳液动态光散射测定

使用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对样品溶液进行粒径分布测定。颗粒折射率 1.46,分散剂折射率 1.33,吸收参数 0.001^[17]。

1.3.5 乳液表面静电荷测定

参考 ZISU 等^[18]的方法采用 Zeta 电位仪测定样品的 ζ -电位,上样体积为 1 mL,测定温度为 25℃,温

度平衡时间为 2 min。

1.3.6 乳液乳层析指数测定

参考 MORALES 等^[19]的方法测定乳层析指数。室温条件下将制备好的样品静置 7 d,每天同一时刻记录乳液在比色管分层界面的刻度,用以衡量乳液分离的程度。乳层析指数的计算公式为

$$B = H_c/H_E \times 100\%$$

式中 H_c ——清液高度
 H_E ——乳液总高度

1.3.7 乳液蛋白吸附率测定

参考 LIANG 等^[20]的方法测定复合乳液蛋白吸附率。将新鲜样品在 12 000 g 的条件下离心 45 min,使样品乳液分层。将底部清液小心取出,使用 0.45 μm 滤膜过滤后,使用凯氏定氮法测定滤膜过滤后的蛋白质量比 C_{SER} 。蛋白吸附率的计算公式为

$$P = (C_{INI} - C_{SER})/C_{INI} \times 100\%$$

式中 C_{INI} ——最初乳液中总的蛋白质量比,g/g
 C_{SER} ——上清液中的蛋白质量比,g/g

1.3.8 乳液抗氧化性测定

(1) DPPH 自由基清除率

参照 LIU 等^[21]测定的方法并稍作修改。将 DPPH 溶于乙醇中制成 100 μmol/L 的溶液,取 2 mL 该溶液加入到 2 mL 的样品中,在室温下将反应混合物摇动混匀,并在黑暗环境中放置 30 min。测定其在 517 nm 处的吸光度作为空白。自由基清除活性以 DPPH 变色百分比计算,DPPH 自由基清除率公式为

$$E = \frac{1 - (A_i - A_j)}{A_0} \times 100\%$$

式中 A_0 ——空白样品的吸光度
 A_i ——在不同测试样品存在下的吸光度
 A_j ——空白试剂的吸光度

(2) ABTS⁺·清除率

根据 CHEW 等^[22]所述方法进行实验并稍作修改。将 7 mol/L 的 ABTS⁺溶液加入到 2.45 mol/L 的过硫酸钾水溶液,在室温下避光 12 ~ 16 h。静置 12 h 处理后用磷酸缓冲盐溶液(PBS)稀释至在 734 nm 处吸光度为 0.70 ± 0.02。添加 0.2 mL 的样品溶液到 3.8 mL 稀释后的 ABTS⁺溶液中后静置 6 min,测定在 734 nm 处的吸光度。在空白样品中,使用 0.2 mL 水代替样品。ABTS⁺·清除率计算公式为

$$F = \frac{1 - (A_i - A_j)}{A_0} \times 100\%$$

1.3.9 数据统计及分析

所有的实验至少进行 3 次,利用 SPSS Statistics

软件对数据进行 ANOVA 差异显著性分析。采用 Origin 9.1 软件、PeakFit 4.12 分析软件对数据进行处理。

2 结果与讨论

2.1 流体动力学半径及其分布测定结果

粒径分布可以评价花青素复合后乳液的稳定性,粒径 D 可以衡量热处理 SPI-花青素复合乳液的油滴尺寸,进而评价乳液的乳化性^[23]。

本实验探究 6 种乳液样品的粒径分布及大小。图 1(图中粒径单位为 μm)为热处理 SPI-花青素复合乳液的粒径分布情况。由图 1 可知,所有复合乳液均呈现为双峰分布,但峰值均不同。在热处理 SPI-花青素复合乳液的样品中,与 0 号样品相比,1 ~ 5 号样品与其均有明显差异,且有向小粒径方向移动的趋势,这表明花青素的加入可以改善复合乳液的粒径分布情况。在横坐标长度上,所有样品中 4 号样品(蛋白与花青素质量比为 40)的粒径分布范围最窄,表明其具有更好的稳定性。

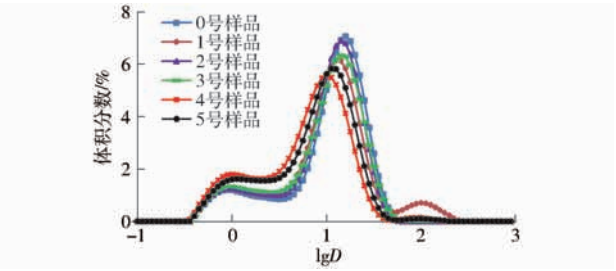


图 1 热处理大豆分离蛋白-花青素复合乳液粒径分布
Fig.1 Droplet size distribution of heated SPI-anthocyanins hydrolysates emulsion

6 种复合乳液的 $D_{4,3}$ ($D_{4,3}$ 表示体积平均粒径)结果如图 2 所示,经过花青素复合的复合乳液(1 ~ 5 号样品)其 $D_{4,3}$ 值明显低于未复合花青素的乳液(0 号样品)。且随着花青素添加量的增加,热处理 SPI-花青素复合液的 $D_{4,3}$ 变化趋势为先减小后增大。其中 0 号样品具有最大的 $D_{4,3}$,为 16.20 μm,4 号样品具有最小的 $D_{4,3}$,为 8.16 μm。5 号样品与

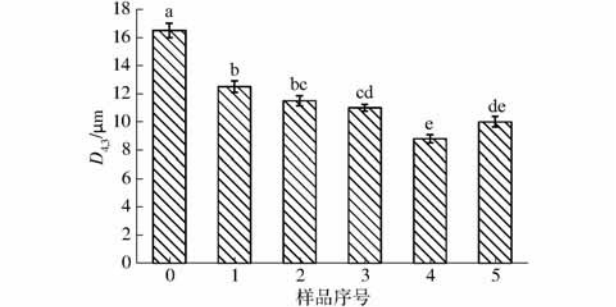


图 2 热处理大豆分离蛋白-花青素复合乳液 $D_{4,3}$
Fig.2 $D_{4,3}$ value of heated SPI-anthocyanins hydrolysates emulsion

4 号样品相比 $D_{4,3}$ 略有增加,为 10.20 μm ,可能是由于静电斥力的减弱,二者之间具有吸引力减弱,从而使粒径增大,这与实验中乳液乳化活性的变化规律相一致。BARTOLOME 等^[24]研究发现,低分子量酚类的加入可以改善牛血清白蛋白的粒径大小,从而改善乳液的液滴分布,与本文研究结果一致。

2.2 ζ -电位测定结果

ζ -电位的测定对于复合乳液稳定性的评价有着重要的意义。复合花青素后乳液的电位如图 3 所示。在所有乳液样品中,在未加花青素的条件下(0 号样品) ζ -电位绝对值最低, ζ -电位约为 -15 mV。复合花青素后的乳液样品的 ζ -电位绝对值增大。当蛋白与花青素的质量比为 40(4 号样品)时,乳液的 ζ -电位绝对值最大, ζ -电位约为 -25 mV。然而,当蛋白与花青素的质量比为 20(5 号样品)时,样品 ζ -电位绝对值反而有所降低,但其绝对值仍高于 0 号空白样品(花青素添加量为 0)。这可能是由于花青素的添加导致蛋白质的结构发生变化,产生的静电斥力增大,使乳液的 ζ -电位绝对值增大,此外由于蛋白与花青素的结合,使蛋白内本身的正电荷与带负电的花青素发生结合,从而使负电荷增多^[25]。但是当花青素添加量较多时(5 号样品),乳液的 ζ -电位绝对值变小,这可能是因为花青素添加量过多,热处理 SPI 与花青素无法发生较好的相互作用,从而增加了正电荷的暴露所导致的。 ζ -电位的实验结论与复合乳液的乳化稳定性的结论吻合。由此可以说明花青素的加入能够改变复合乳液的 ζ -电位,从而改善复合乳液的乳化性^[26]。

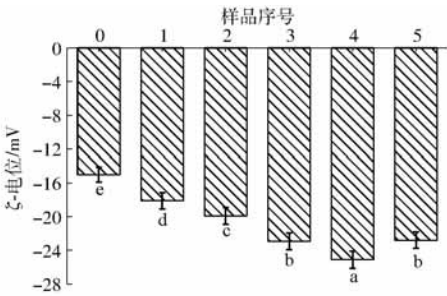


图 3 热处理大豆分离蛋白-花青素复合乳液 ζ -电位
Fig. 3 ζ -potential of heated SPI-anthocyanins hydrolysates emulsion

2.3 乳层析指数分析

乳层析指数是指在储存过程中乳液中水相和油相的分离或者聚集的程度,从而评价乳液的平衡稳定性^[27]。

图 4 为热处理 SPI-花青素复合乳液的乳层析指数。所有复合乳液在经过 7 d 的储存后都出现了分层现象。未经花青素复合的乳液(0 号样品)具有最高的乳层析指数(CI 值),最大的 CI 值即为其稳

定性最差。通过前期观察发现,未加入花青素的复合乳液(0 号样品)在储存 1 d 后就发生了分层,这是因为未加入花青素的乳液水油不平衡而引起油脂上浮^[28]。与空白样品(未加入花青素样品)相比,经过花青素复合的热处理 SPI-花青素复合乳液其 CI 值较低,具有更好的乳液稳定性。所有样品中 4 号样品(蛋白与花青素的质量比为 40)具有最低的 CI 值(41%),说明在所有花青素复合的热处理 SPI-花青素复合乳液中,其具有最好的稳定性。该 CI 值的结果与之前实验研究的乳化稳定性结果一致^[29]。这说明热处理 SPI-花青素复合乳液的形成可以很好地阻止油相和水相的分离,防止复合乳液出现油脂上浮,从而提高复合乳液的储存稳定性。另外花青素的复合使乳液的负电荷增多,可以有效阻止乳液发生分层,油滴之间具有充足的排斥力^[30]。在乳液中,热处理 SPI 吸附在牡丹籽油表面,可以有效阻止复合乳液发生分层,且花青素的复合会改变热处理 SPI 的结构,使花青素与热处理 SPI 发生紧密的结合,进而提高复合乳液的稳定性。

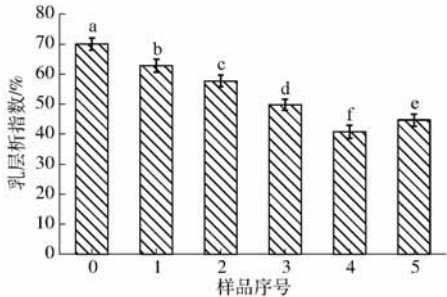


图 4 热处理 SPI-花青素共建复合乳液的乳层析指数
Fig. 4 Emulsion creaming index of heated SPI-anthocyanins hydrolysates emulsion

2.4 界面蛋白质量浓度测定结果

花青素复合后热处理 SPI-花青素复合乳液的界面蛋白质量浓度如图 5 所示,界面蛋白质量浓度由 1.3.7 节中的蛋白吸附率与比表面积比值获得,比表面积由 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测得。

由图 5 可知,经过花青素复合的乳液其界面蛋

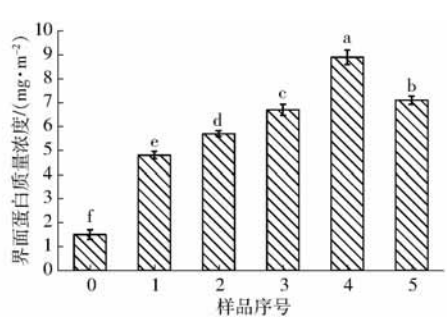


图 5 热处理 SPI-花青素复合乳液界面蛋白质量浓度
Fig. 5 Protein concentration of heated SPI-anthocyanins hydrolysates emulsion

白质量浓度呈现先上升后下降的变化趋势,但与空白样品相比其界面蛋白质量浓度均提高。通常乳液的界面蛋白质量浓度会决定热处理 SPI 吸附至油-水界面的能力。1~4 号样品随着花青素添加量的不断增加,复合乳液界面蛋白质量浓度从 4.76 mg/m^2 提高至 8.29 mg/m^2 ,而未经热处理的样品界面蛋白质量浓度为 1.75 mg/m^2 。该结果说明适宜的花青素复合比例可以导致热处理 SPI 的结构舒展,从而使热处理 SPI 更好地吸附到乳液的油-水界面。同时花青素与热处理 SPI 相互作用后也可以吸附在乳液的油-水界面,从而形成双乳化层。因此复合乳液的界面蛋白质量浓度增加。当蛋白与花青素的质量比为 20(5 号样品)时,乳液界面蛋白质量浓度相比于 4 号样品时略有降低,为 6.36 mg/m^2 ,但仍高于空白样品(0 号样品),可能是由于花青素的添加量过大,花青素与热处理 SPI 间相互作用出现不溶性的聚集体,从而使吸附于油-水界面的蛋白及蛋白-花青素复合物脱离。以上结果说明热处理 SPI-花青素复合乳液中蛋白吸附界面的能力与花青素的添加量有关^[31]。

2.5 氧化稳定性测定结果

花青素对热处理 SPI 抗氧化性影响如图 6 所示,由图 6 可知,随着花青素添加量的增加,乳液 DPPH 自由基和 ABTS^+ 清除率先上升后略有下降,但 1~5 号样品均要好于 0 号样品,这可能是由于花青素自身具有抗氧化性,与热处理 SPI 发生相互作用后形成复合物具有花青素所携带的抗氧化性,另一方面,SILVESTRE 等^[32]研究发现,水包油型乳液的氧化性受包裹脂质的界面膜性质的影响,乳化液滴界面厚度是影响乳液态食品抗氧化性的重要因素。因此热处理 SPI 与花青素在乳液界面形成韧性及机械强度较好的界面膜是乳液具有良好抗氧化性的重要因素。因而对于 1~4 号样品,随着花青素添加量的增多,其复合乳液抗氧化性不断提高。但继续增加花青素添加量(5 号样品),其复合乳液抗氧化性较 4 号样品有所降低,但仍高于空白样品。这可能是由于当花青素添加量较多时,花青素与热处理 SPI 作用生成不溶性聚集体,从界面膜上游离,从而使界面膜机械强度降低,进而导致复合乳液的抗氧化性有所下降。根据此实验结果发现,花青素的添加能够提升复合乳液的抗氧化性。DUBEAU 等^[33]研究牛奶对茶叶样品抗氧化能力,发现不同方法测定的研究结果相互矛盾,通过 ABTS 法发现牛奶降低了茶叶的抗氧化能力。相比之下,脂质过氧

化法(LPO)结果表明,牛奶可显著提高茶叶的抗氧化性。由此发现牛奶对茶叶的抗氧化性具有双重效应,在溶液或者固-液界面中起到抑制作用,在水包油乳液中具有增强作用,与本实验结果相符。

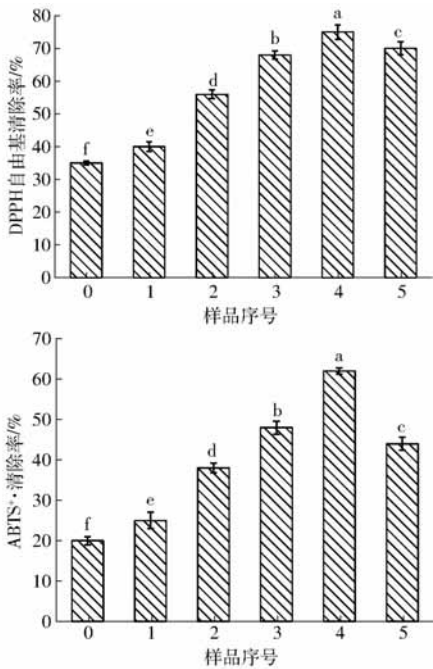


图 6 热处理 SPI-花青素复合乳液的抗氧化活性
Fig. 6 Antioxidant activities of heated SPI-anthocyanins hydrolysates emulsion

3 结论

- (1)利用动态光散射从宏观角度评价花青素复合对复合乳液粒径大小以及分布上的影响。花青素复合后,复合乳液的粒径变小,这是由于静电斥力的增强,蛋白与花青素之间具有更大的吸引力,发生了紧密的缩合从而使粒径变小,这与实验中乳液乳化活性的变化规律相一致。
- (2)采用乳化稳定性、乳层析指数和 ζ -电位分析,分别从不同的视角评价复合乳液的稳定性。花青素复合后,乳液的乳化性上升,乳层析指数显著降低, ζ -电位的绝对值增加,说明乳液液滴间的静电斥力大,不易发生聚集。所有样品中 4 号样品具有最低的 CI 值(41%)和最大的电位绝对值,说明在所有花青素复合的热处理 SPI-花青素复合乳液中,其稳定性最佳。
- (3)乳液氧化稳定性实验结果表明,随着花青素浓度的增加,乳液 DPPH 自由基和 ABTS^+ 清除率先上升后略有下降,其中蛋白与花青素的质量比为 40 时乳液抗氧化性最佳。由此可知,花青素的添加可以有效提高复合乳液氧化稳定性。

参 考 文 献

- [1] GRAHAM D E, PHILLIPS M C. Proteins at liquid interfaces: III. Molecular structures of adsorbed films[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1979, 70(3): 427–439.
- [2] 王中江, 江连洲, 魏冬旭, 等. pH 值对大豆分离蛋白构象及表面疏水性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 47–51.
WANG Zhongjiang, JIANG Lianzhou, WEI Dongxu, et al. Effect of pH on conformation and surface hydrophobicity of soybean protein isolate[J]. Food Science, 2012, 33(11): 47–51. (in Chinese)
- [3] 曾瑞琪, 张明政, 张甫生, 等. 高酯果胶对酸化大豆蛋白凝胶流变及质构特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 113–120.
ZENG Ruiqi, ZHANG Mingzheng, ZHANG Fusheng, et al. Effects of high-ester pectin on rheological and texture properties of acidified soybean protein gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 113–120. (in Chinese)
- [4] WANG Z, LI Y, JIANG L, et al. Relationship between secondary structure and surface hydrophobicity of soybean protein isolate subjected to heat treatment[J]. Journal of Chemistry, 2014, 12(5): 1–10.
- [5] WANG J M, XIA N, YANG X Q, et al. Adsorption and dilatational rheology of heat-treated soy protein at the oil-water interface: relationship to structural properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(12): 3302–3310.
- [6] NIZAMUTDINOVA I T, KIM Y M, CHUNG J I, et al. Anthocyanins from black soybean seed coats preferentially inhibit TNF- α -mediated induction of VCAM-1 over ICAM-1 through the regulation of GATAs and IRF-1[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(16): 7324–7330.
- [7] COLLINS B, HOFFMAN J, MARTINEZ K, et al. A polyphenol-rich fraction obtained from table grapes decreases adiposity, insulin resistance and markers of inflammation and impacts gut microbiota in high-fat-fed mice[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2016, 31: 150–165.
- [8] JENNINGS A, WELCH A A, FAIRWEATHER-TAIT S J, et al. Higher anthocyanin intake is associated with lower arterial stiffness and central blood pressure in women[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2012, 96(4): 781–788.
- [9] KONCZAK I, ZHANG W. Anthocyanins—more than nature's colours[J]. BioMed Research International, 2004(5): 239–240.
- [10] MULAUDZI R B, NDHLALA A R, KULKARNI M G, et al. Pharmacological properties and protein binding capacity of phenolic extracts of some Venda medicinal plants used against cough and fever[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2012, 143(1): 185–193.
- [11] HE Z, ZHU H, XU M, et al. Complexation of bovine β -lactoglobulin with malvidin-3-O-glucoside and its effect on the stability of grape skin anthocyanin extracts[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 234–240.
- [12] KANAKIS C D, HASNI I, BOURASSA P, et al. Milk β -lactoglobulin complexes with tea polyphenols[J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 1046–1055.
- [13] PRIGENT S V E, VORAGEN A G J, VAN KONINGSVELD G A, et al. Interactions between globular proteins and procyanidins of different degrees of polymerization[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(12): 5843–5853.
- [14] JIA Z, ZHENG M, TAO F, et al. Effect of covalent modification by (–)-epigallocatechin-3-gallate on physicochemical and functional properties of whey protein isolate[J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 66: 305–310.
- [15] MEINLSCHMIDT P, SCHWEIGGERT-WEISZ U, BRODE V, et al. Enzyme assisted degradation of potential soy protein allergens with special emphasis on the technofunctionality and the avoidance of a bitter taste formation[J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 68: 707–716.
- [16] SUI X, BARY S, ZHOU W. Changes in the color, chemical stability and antioxidant capacity of thermally treated anthocyanin aqueous solution over storage[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 516–524.
- [17] XU D X, ZHANG J J, CAO Y P, et al. Influence of microcrystalline cellulose on the microrheological property and freeze-thaw stability of soybean protein hydrolysate stabilized curcumin emulsion[J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 66: 590–597.
- [18] ZISU B, SCHLEYER M, CHANDRAPALA J. Application of ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk[J]. International Dairy Journal, 2013, 31(1): 41–43.
- [19] MORALES R, MARTINEZ K D, RUIZ-HENESTROSA V M P, et al. Modification of foaming properties of soy protein isolate by high ultrasound intensity: particle size effect[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26: 48–55.
- [20] LIANG H N, TANG C H. Pea protein exhibits a novel pickering stabilization for oil-in-water emulsions at pH 3.0[J]. Food Science and Technology, 2014, 58(2): 463–469.
- [21] LIU S C, LIN J T, WANG C K, et al. Antioxidant properties of various solvent extracts from lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) flowers[J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 577–581.
- [22] CHEW Y L, GOH J K, LIM Y Y. Assessment of in vitro antioxidant capacity and polyphenolic composition of selected medicinal herbs from Leguminosae family in *Peninsular malaysia*[J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 13–18.
- [23] KIM K H, RENKEMA J M S, VAN V T. Rheological properties of soybean protein isolate gels containing emulsion droplets[J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(3): 295–302.

- dietetics students of Wroclaw Medical University [J]. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.*, 2013, 64(3):183–190.
- [30] BECK H C, HANSEN A M, LAURITSEN F R. Catabolism of leucine to branched-chain fatty acids in *Staphylococcus xylosus* [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2004, 96:1185–1193.
- [31] EMANUELA Z, SERGIO G, ALESSANDRA B, et al. Lipolysis and lipid oxidation in fermented sausages depending on different processing conditions and different antioxidants [J]. *Meat Science*, 2004, 66(2):415–423.
- [32] BENET I, GUÀRDIA M D, IBÁÑEZ C, et al. Analysis of SPME or SBSE extracted volatile compounds from cooked cured pork ham differing in intramuscular fat profiles [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2015, 60(1):393–399.
- [33] MOTTRAMD S. Flavor formation in meat and meat products: a review [J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4):415–424.
- [34] FRANKEL E N. Lipid oxidation [M]. Bridgewater: The Oily Press, 2005:34–35.
- [35] 吴娜,王锡昌,陶宁萍,等. 动物源食品中脂质氧化降解对香气物质形成的作用[J]. *中国食品学报*, 2016, 7(16):209–251.
WU Na, WANG Xichang, TAO Ningping, et al. Contribution of lipid oxidation and degradation to the formation of aroma compounds in animal-derived foods [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 7(16):209–251. (in Chinese)
- [36] VARLET V, KNOCKAERT C, PROST C, et al. Comparison of odor active volatile compounds of fresh and smoked salmon [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(9):3391–3401.
- [37] NIETO G, BANON S, GARRIDO M D. Effect of supplementing ewes' diet with thyme (*Thymus zygis* ssp. *gracilis*) leaves on the lipid oxidation of cooked lamb meat [J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(4):1147–1152.
- [38] PMGLIESE C, SIRTORI F, CALAMAI L, et al. The evolution of volatile compounds profile of “Toscano” dry-cured ham during ripening as revealed by SPME–GC–MS approach [J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2010, 45(9):1056–1064.
- [39] MURIEL E, ANTEQUERA T, PETRÓN M J, et al. Volatile compounds in Iberian dry-cured loin [J]. *Meat Science*, 2004, 68(3):391–400.
- [40] STAHNKE L H. Aroma components from dried sausages fermented with *Staphylococcus xylosus* [J]. *Meat Science*, 1994, 38(1):39–53.
- [41] WOLF I V, PEROTTI M C, ZALAZAR C A. Composition and volatile profiles of commercial Argentinean blue cheeses [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(2):385–393.
- [42] MCSWEENEY P L H, FOX P F. Metabolism of residual lactose and of lactate and citrate [J]. *Cheese Chemistry Physics & Microbiology*, 2004(4):361–371.

(上接第 335 页)

- [24] BARTOLOME B, ESTRELLA I, HERNANDEZ M T. Interaction of low molecular weight phenolics with proteins (BSA) [J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(4):617–621.
- [25] VON S M, PIZONES RUIZHENESTROSA V M, AMR P. Green tea polyphenols- β -lactoglobulin nanocomplexes: interfacial behavior, emulsification and oxidation stability of fish oil[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35:505–511.
- [26] LIU W, SUN D, LI C, et al. Formation and stability of paraffin oil-in-water nano-emulsions prepared by the emulsion inversion point method[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 303(2):557–563.
- [27] WONG D W, CAMIRAND W M, PAVALATH A E. Structures and functionalities of milk proteins[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1996, 36(8):807–844.
- [28] KUHN K R, CUNHA R L. Flaxseed oil-whey protein isolate emulsions: effect of high pressure homogenization[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(2):449–457.
- [29] 江连洲,陈思,李杨,等. 大豆分离蛋白-花青素复合物的制备及其蛋白结构与功能性质分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(10):20–27.
JIANG Lianzhou, CHEN Si, LI Yang, et al. Effects of complexation with anthocyanin on the structural and functional properties of denatured soybean protein[J]. *Food Science*, 2018, 39(10):20–27. (in Chinese)
- [30] CHANAMAI R, MCCLEMENTS D J. Impact of weighting agents and sucrose on gravitational separation of beverage emulsions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(11):5561–5565.
- [31] KLEMASZEWSKI J L, DAS K P, KANG Y J, et al. Effects of controlled sulfitolysis of bovine serum albumin on droplet size and surface area of emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1990, 38(3):647–650.
- [32] SILVESTRE M P C, CHAIVASIT W, BRANNA R G, et al. Ability of surfactant headgroup size to alter lipid and antioxidant oxidation in oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(6):2057–2061.
- [33] DUBEAU S, SAMSON G, TAJMIR-RIABI H A. Dual effect of milk on the antioxidant capacity of green, Darjeeling, and English breakfast teas[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(3):539–545.