等电点附近大豆分离蛋白乳化稳定性的研究

刘永创，杨晓泉，郭健，周倩

（华南理工大学轻工与食品学院食物蛋白工程研究中心，广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室，广东 广州 510640）

摘要：等电点附近的大豆蛋白由于所带电荷减少、疏水相互作用增强而以聚集体的形式存在且其溶解性较差，故鲜有研究者关注该条件下大豆蛋白的乳化特性。本研究从颗粒稳定乳液的角度出发，分别以等电点附近（pH 5.0）和远离等电点（pH 7.0）两个条件制备了大豆分离蛋白（soy protein isolate，SPI）稳定的乳液，比较了两种条件下 SPI 的界面性质及所得乳液的储藏稳定性。结果发现，pH 5.0 时 SPI 的溶解度仅为 4.70±0.15%，远远低于 pH 7.0 时的 93.28±1.89%；然而 SPI 浓度为 0.50%时，pH 5.0 的界面压却高于 pH 7.0；以 pH 5.0 条件制备的 SPI 乳液，其界面蛋白吸附量高达 87.03±1.28%，而 pH 7.0 制备的乳液仅为 36.15±1.48%；pH 5.0 的乳液两个月后液滴的平均粒径为 63.15±0.30 μm，与新鲜制备乳液（62.36±0.41 μm）相比基本不变；pH 7.0 的乳液经过两个月储藏后其液滴平均粒径从 45.78±0.38 μm 增加至 55.19±1.86 μm。可见，以等电点附近条件制备的 SPI 乳液依然具有良好的储藏稳定性。

关键词：大豆分离蛋白；等电点；乳化性；稳定性

文章篇号：1673-9078(2015)5-84-89 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.014

Emulsifying Properties of Soy Protein Isolate at pH near the Isoelectric Point

LIU Yong-chuang, YANG Xiao-quan, GUO Jian, ZHOU Qian

(Research and Development Center of Food Proteins, School of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Products Safety, Guangzhou 510640 China）

Abstract: At pH near the isoelectric point (pI), soy protein exhibits reduced electric charge and enhanced hydrophobic interactions, causing aggregation that results in poor solubility. Therefore, the emulsifying properties of soy protein under these conditions have received little attention. In this study, a soy protein isolate (SPI) was used to prepare stable emulsions at pH 5.0, which was near the pI, and pH 7.0, which was far from the pI. Soy protein aggregate particles were used to stabilize the emulsion. The interfacial properties of SPI under such conditions and the storage stability of the resulting emulsions were investigated. The results indicated that the solubility of SPI was 4.70 ±0.15% at pH 5.0, which was much lower than that at pH 7.0 (93.28 ±1.89%). At a concentration of 0.5% SPI, higher surface tension was observed at pH 5.0 when compared with that at pH 7.0. Moreover, the surface protein adsorption capacity of the emulsion prepared at pH 5.0 was 87.04 ±1.28%, which was significantly higher than that prepared at pH 7.0 (36.15 ±1.48%). After two months of storage, the average size of the droplets in the emulsion prepared at pH 5.0 was 63.15 ± 0.30 μm, which was similar to that of the droplets in freshly prepared emulsion (62.36 ±0.41 μm). In the case of the emulsion prepared at pH 7.0, the average size of the droplets increased from 45.78 ±0.38 to 55.19 ±1.86 μm after storage for two months. Thus, we conclude that SPI prepared at pH near its isoelectric point can be used as an efficient emulsifier.

Key words: soy protein isolate; isoelectric point; emulsifying properties; stability

乳化性是大豆蛋白主要的功能特性之一。大豆蛋白的乳化特性是由其两亲性分子结构决定；其分子结构中既有羧基和羟基等亲水基团，又有苯环和长链烃基等疏水基团，因此大豆蛋白可以在油-水或气-水界面有序排列和定向吸附，从而降低界面张力。在实际生产中，大豆蛋白常作为乳化剂广泛应用于泡沫和乳液等食品体系。

影响大豆蛋白乳化性的因素有很多，如溶解度、蛋白质浓度、pH、空间结构和离子强度等[1]。许多研究认为，大豆蛋白的乳化性直接受其溶解度的影响，

收稿日期：2014-09-09

基金项目：中国博士后科学基金一等资助（2013M530367）；中国博士后科学基金特别资助（2014T70811）；“十二五”国家科技支撑计划项目（2012BAD33B10）和国家自然科学基金面上项目（31371744）

作者简介：刘永创（1989-），男，硕士，研究方向：植物蛋白开发与利用

通讯作者：杨晓泉（1965-），男，教授，研究方向：植物蛋白开发与利用

只有当氮溶指数达到一定程度才能起到良好的乳化效果[2]。研究者目前大多采用乳化活性指数（em ulsifying activity index，EAI）和乳化稳定指数（emulsifying stability index，ESI）来评价大豆蛋白的乳化性[1, 3]。大豆蛋白在接近等电点条件下的溶解性较差，其 EAI 和 ESI 远低于远离等电点条件下的值，所以普遍认为等电点条件下的大豆蛋白不具备良好的乳化性[4,5]。研究者也很少用处于等电点附近的大豆蛋白制备乳液并对此乳液的稳定性进行研究。然而，大豆分离蛋白是常用的一种食品配料，等点电附近较差的溶解性限制了其在 pH 值 5.0 左右的一些食品当中的应用。在大豆分离蛋白等电点条件下制备乳液并加以应用可以填补等电点条件下大豆分离蛋白在食品体系中的应用空白，对扩展大豆分离蛋白的应用范围、丰富其利用形式具有一定的意义。

近年来，以具有纳微尺度的颗粒或聚集体制备 Pickering 乳液的研究越来越受到研究者的关注，很多食品领域研究者都致力于以蛋白质等可食性原料制备颗粒稳定的乳液。Liu 等[6]通过热处理和控制盐离子浓度在中性条件下制备了大豆分离蛋白（soy protein isolate，SPI）聚集体颗粒，由该颗粒稳定的乳液显示出了良好的储藏稳定性。de Folter 等[7]以反溶剂法制备了玉米醇溶蛋白（zein）颗粒，研究发现以该颗粒稳定的乳液也表现出良好的稳定性。处于等电点附近的大豆蛋白由于其所带电荷减少、疏水相互作用增强而以聚集体形式存在，也属于纳微颗粒的范畴，而该颗粒的乳化性尚未引起研究者的关注。

本研究从颗粒稳定乳液的角度出发，以 SPI 为原料在 pH 5.0 条件下制备乳液，将其与远离等电点条件下（pH 7.0）制备的乳液进行比较，从油-水界面张力、乳液界面蛋白含量、乳液储藏稳定性等角度研究大豆蛋白在接近等电点条件下的乳化特性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低温脱脂豆粕，购于山东新嘉华股份有限公司；食用级金龙鱼大豆油，购于广州五山南天超市；其他所用试剂均为分析纯，实验用水均为去离子水。

1.2 仪器与设备

CR22G 高速冷冻离心机，日本 Hitachi 公司；Alpha-4 冷冻干燥机，德国 Christ 公司；数显 pH 计，德国 Mettler Toledo 公司；T25 Ultraturrax 高速分散均质机，德国 IKA 公司；ZS-Nano 和 Mastersizer 2000 激光粒度仪，英国 Malvern 公司；OCA20 视频光学接触角测量仪，德国 Dataphysics 公司；Bx51 光学显微镜，日本 Olympus 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大豆分离蛋白的提取

本研究利用碱溶酸沉法提取 SPI。将低温脱脂豆粕粉碎后，过 60 目筛，按 1:10 的料液比加去离子水搅拌，用 2 N NaOH 调 pH 至 8.0，室温下低速搅拌 2 h，料液离心（8000 *g*，20 min，20 ℃）后弃沉淀，用 1 N 盐酸调 pH 至 4.5，料液再次离心（8000 g，20 min，20 ℃）后弃上清，该沉淀即为 SPI。将沉淀以 1:10 的量加入去离子水，用 2 N NaOH 调 pH 至 7.5，搅拌使其充分溶解，并在 4 ℃下用去离子水透析 48 h 脱盐，经冷冻干燥后室温保存备用。

1.3.2 蛋白质溶解度的测定

将 SPI 以 1 wt%浓度分散于去离子水中，并调至不同的 pH。待其充分水化后于室温以 10000×g 离心 20 min，采用 Lorry 法测定上清液的蛋白含量，以牛血清白蛋白（BSA）为标准蛋白制备标准曲线[8]。

样品溶解度=上清液中蛋白质含量/样品蛋白质含量×100%

1.3.3 蛋白质 zeta-电位的测定

采用 Malvern ZS-Nano 激光粒度仪，利用动态光散射技术对 SPI 在不同 pH 条件下的 zeta-电位进行测定。将 SPI 以 0.5 wt%的浓度分散于去离子水中，并调至不同 pH，注入相应的样品池中于 25 ℃下进行 zeta-电位测试。

1.3.4 界面张力的测定

本研究采用 OCA20 视频光学接触角测量系统，根据 Wan 等报道的方法[9]观察大豆蛋白在油-水界面上的界面张力（δ）随吸附时间（t）的变化。测试用大豆油首先进行纯化：取 3.0 g 分子筛吸附剂于 100 mL 大豆油中，经过搅拌、静置和离心等步骤后加入新的吸附剂，重复上述操作三次，直到去离子水与油的界面张力在 30 min 内不发生显著变化。纯化后的大豆油的密度为 0.9142 g/cm^3。测试前，将大豆油盛放于玻璃槽中（约为 2/3 槽体积）；然后将与毛细管连接的针头（外径 1.65 mm，内径 1.19 mm）插进油相中，推进 15 μL 的样品，持续测定 3 h。界面张力随吸附时间的变化也可以通过动态界面压力（π）来反映，$\pi=\delta_0-\delta$，δ_0 为纯水对油相的界面张力。

1.3.5 乳液制备方法

SPI 分散于去离子水中，于室温下搅拌 3 h，配制成 4 wt%的分散液，而后在 4 ℃冰箱中静置过夜，使

蛋白质充分水化。用前将其稀释至一定的蛋白浓度，以 1N NaOH 或 1N 盐酸调至目标 pH，并加入 0.02 wt%叠氮钠抑制微生物生长，然后加入一定量大豆油，常温下用剪切机在 6000 r/min 条件下均质分散 2 min 制得乳液。所得乳液中蛋白含量为 0.5 wt%，大豆油的添加量为 40 wt%。考察 SPI 浓度对乳液稳定性影响时，油添加比例为 40wt%，SPI 浓度分别为 0.1、0.2、0.5、1 和 2%；考察油比例对乳液稳定性影响时，SPI 浓度为 0.5%，油添加比例分别为 10、20、30、40 和 50%；考察盐离子浓度对乳液稳定性影响时，以 0.5 wt% SPI 和 40 wt%油制成乳液后在体系中添加一定量的 2mol/L 的 NaCl 使其最终浓度为 1、10、100 和 400 mMol/L。

1.3.6 乳液粒径测定

采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定乳状液滴的粒径大小。参数设置如下：颗粒折射率为 1.520，颗粒吸收率为 0.001，分散剂折射率为 1.330。实验采用 $d_{[4\,3]}$，即体积平均直径表征液滴粒度的大小。

1.3.7 乳析指数测定

取 10 mL 新鲜制备的乳液于具塞比色管中，室温下放置，定期测量乳液分层后样品底部清液层的高度。乳液的分层指数(Creaming index)=清液层高度(HS)/样品的总高度(HT)×100%。

1.3.8 显微镜观察

取 400 μL 乳液样品于 1.5 mL 的离心管中，加入等体积去离子水使样品的浓度稀释一倍，然后吸取 20 μL 稀释液于载玻片上，小心盖上盖玻片后置于载物台上进行观察，先在 4 倍物镜下找到清晰的视野，然后切换到 10 倍物镜进行观察放大倍率为（10×10），拍摄并保存图片。

1.3.9 界面蛋白含量的测定

采用 Zhang 等报道的方法[10]，将制备得到的新鲜乳液（蛋白质浓度为 0.5 wt%，大豆油的含量为 40 wt%）在 25 ℃条件下 8000 r/min 离心 1 h。经过离心后，乳液分为上下两层，上部为乳析层，下部为水层。用注射器吸出水相，采用 Lowry 法测定水相中蛋白质的浓度。吸附到界面上的蛋白质的含量计算公式为 F_{ads}（%）=（C_{total}-C_{serum}）/C_{total}×100%，其中 C_{total} 为乳液中蛋白质的总浓度，C_{serum} 为水层中的蛋白质浓度。

1.3.10 数据分析

采用 Excel 对数据进行处理和分析，每个处理重复实验 3 次，所得结果以均值±标准偏差(Means±SD)表示；用 SPSS 软件对数据进行显著性分析；利用软件 Origin Pro 8 对所得数据绘制成图。

2 结果与讨论

2.1 SPI 在不同 pH 条件下的溶解度和 zeta-电位

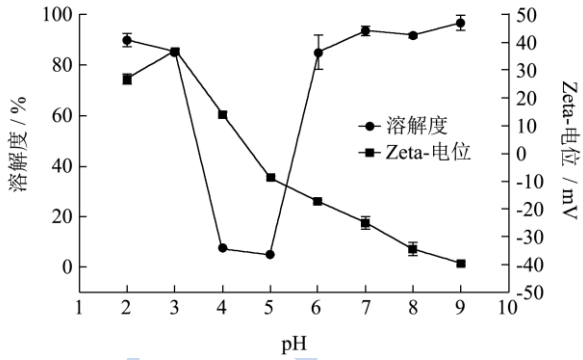


图 1 不同 pH 条件下大豆分离蛋白溶解度

Fig.1 Solubility of soy protein isolate at different pH values

SPI 在不同 pH 条件下的溶解性及 zeta-电位如图 1 所示。SPI 的溶解度随 pH 的改变而变化。在远离等电点的 pH 条件下，SPI 溶解度较高，均在 85%以上。SPI 在碱性条件下（pH>7）溶解度比酸性条件下（pH<3）的略高。但当 pH 接近 SPI 等电点（pH 4.0 和 5.0），其溶解度不足 10%，远远低于远离等电点时 SPI 的溶解度。这种现象与蛋白分子的荷电量有关。SPI 的 zeta-电位变化趋势表明，随着 pH 值的降低，SPI 所带电量逐渐减少，尤其在等电点附近，电荷量几乎接近于零。正是由于等电点附近时蛋白分子所带电荷量较少，蛋白分子之间静电排斥作用减弱，疏水相互作用占据主导地位而发生聚集甚至沉淀，所以导致 SPI 溶解度大大降低。

2.2 不同 pH 下 SPI 的油-水界面压

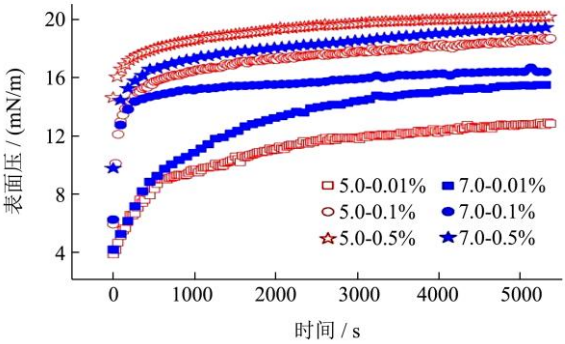


图 2 SPI 在不同 pH 条件下油-水界面的表面压

Fig.2 Oil-water surface pressure of SPI at different pH values

图 2 显示了不同浓度的 SPI 在 pH 5.0 和 7.0 条件下油-水界面的表面压（π）随吸附时间（t）的变化情

况。随着时间的延长，各样品的表面压逐渐增加，这主要是由蛋白分子逐渐吸附到油-水界面并发生真实吸附引起的。当浓度为 0.01%时，pH 7.0 的 SPI 具有更高的 π 值。SPI 浓度较低时，决定界面压变化快慢的关键因素是体相中蛋白分子的扩散速度；若扩散速度快，则蛋白分子就能以更短的时间吸附到界面上而使 π 值增加，由于 pH 7.0 时 SPI 的溶解性明显高于 pH 5.0（图 1），溶解态的蛋白分子具有比聚集态的分子更快的扩散速率，故更容易吸附到界面上使 π 值升高。当浓度为 0.1%和 0.5%时，pH 5.0 时的 SPI 具有更高的 π 值。在蛋白浓度达到某一特定值时，扩散速率的影响已经不是决定 π 值变化的关键因素，而是更大程度上取决于已经吸附到界面上的蛋白分子的行为性质。pH 7.0 时，蛋白分子间因带相同的负电荷而存在静电排斥作用，已经在界面上发生吸附的蛋白分子一方面使得体相中蛋白分子难以向界面靠近，另一方面也影响着界面上其他的蛋白分子。而 pH 5.0 时，蛋白分子所带电荷量较少，分子间静电排斥作用也相对较小，最终使得界面上发生真实吸附的蛋白分子较多，所以具有更高 π 值。

2.3 pH 对大豆蛋白乳液的影响

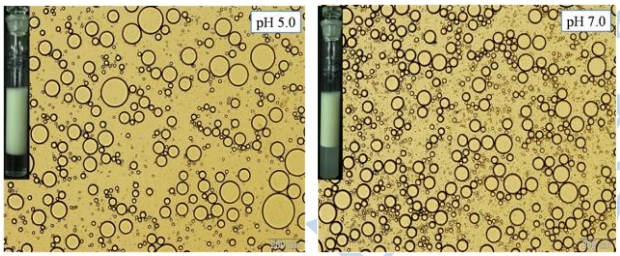


图 3 不同 pH 条件下制备的 SPI 乳液（蛋白浓度 0.5 wt%，油添加量 40 wt%），图中比例尺为 200 μm

Fig.3 SPI emulsions prepared at pH 5.0 and 7.0

在 pH 5.0 和 7.0 条件下制备乳液（蛋白浓度为 0.5 wt%，油添加量为 40 wt%）的外观及显微镜图片如图 3 所示。从乳液外观来看，pH 5.0 条件下制备的乳液，比色管下部的水层呈澄清透明；而 pH 7.0 条件下制备的乳液，比色管下部却呈现出混浊状态。结合两者的显微镜图片进行分析，pH 5.0 的乳液液滴体积较大。由于大豆油密度比水小，故油滴全部集中在比色管上部，使得比色管下部看起来比较澄清；而 pH 7.0 制备的乳液中存在体积相对较小的油滴，并悬浮于比色管下部水层中，所以出现底部混浊不透明的现象。结果表明，在 pH 5.0 条件下，以聚集体形式存在的 SPI 依然能具备 pH 7.0 条件下制备乳液、稳定油水界面的能力。两种条件下制备获得乳液在外观和液滴体积两个方面存在差异。两者储藏两个月前后液滴粒径变化和乳析分层稳定性如表 1 所示。

表 1 不同 pH 条件下乳液的储藏稳定性

Table 1 Storage stability of emulsions at different pHvalues

pH	d_{43}/μm		乳析指数/%	
	1 d	2 月	1 d	2 月
5.0	62.36±0.41^{b}	63.15±0.30^{a}	24.63±0.52^{b}	27.32±0.81^{a}
7.0	45.78±0.38^{b}	55.19±1.86^{a}	39.61±1.43^{b}	42.05±2.65^{a}

注：表中数据为平均数±标准偏差，不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$）。

在 pH 5.0 条件下制备的乳液放置一天后，其液滴的平均粒径为 62.36±0.41 μm；放置两个月后其平均粒径为 63.51±0.30 μm。可见，随着放置时间的延长，该乳液的平均粒径有所增大但基本保持不变。而以 pH 7.0 条件制备的乳液，液滴的平均粒径从初始的 45.78±0.38 μm 增加至 55.19±1.86 μm，增加幅度明显高于 pH 5.0 制备的乳液。两种乳液的乳析指数在储藏两个月后均有一定的增加，但涨幅均在 2%左右，变化并不明显。然而以 pH 5.0 制备获得乳液的乳析指数小于以 pH 7.0 制备的乳液，这说明后者更容易出现乳析分层现象。这可能是由于后者的液滴体积较小在体相中更易流动，液滴之间更可能因碰撞而发生聚合，聚合的乳液粒径变大后上浮而使下部清水层的高度增加，从而表现为乳析指数的增大。而前者的液滴较大，一定程度上减少了液滴之间的碰撞等相互作用，因而粒径变化不明显。因此，相对于 pH7.0 的乳液，pH5.0 条件下制备的乳液粒径变化趋势更少且具有更好的储藏特性。

2.4 乳液的界面蛋白含量

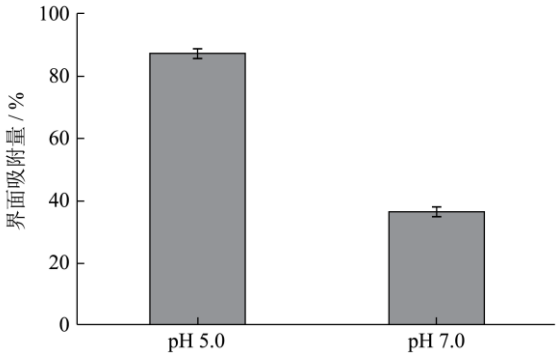


图 4 不同 pH 条件下制备 SPI 乳液的界面蛋白含量

Fig.4 Surface protein adsorption fraction of SPI emulsions at different pHvalues

注：蛋白浓度 0.5 wt%，油添加量 40 wt%。

图 4 显示了 pH 5.0 和 7.0 条件下制备乳液的界面蛋白含量。前者的界面蛋白含量高达 87.03±1.28%；而后者仅为 36.15±1.48%，不及前者的二分之一。虽

然 SPI 在 pH 5.0 时溶解度远低于 pH 7.0 时的溶解度（图 1），但 pH 5.0 时制备得到乳液的界面蛋白含量却大大提高了。这与高浓度时 SPI 在不同 pH 条件下界面压的变化趋势是一致的（图 3），表明等电点附近时蛋白质分子表面静电荷接近为零，吸附到界面上的蛋白分子之间的静电排斥作用大大降低，从而蛋白分子可以牢牢吸附在油滴的表面上而不会轻易从界面上掉下来，故表现为界面蛋白含量有所提高。

2.5 pH 5.0 时影响 SPI 乳液稳定性的因素

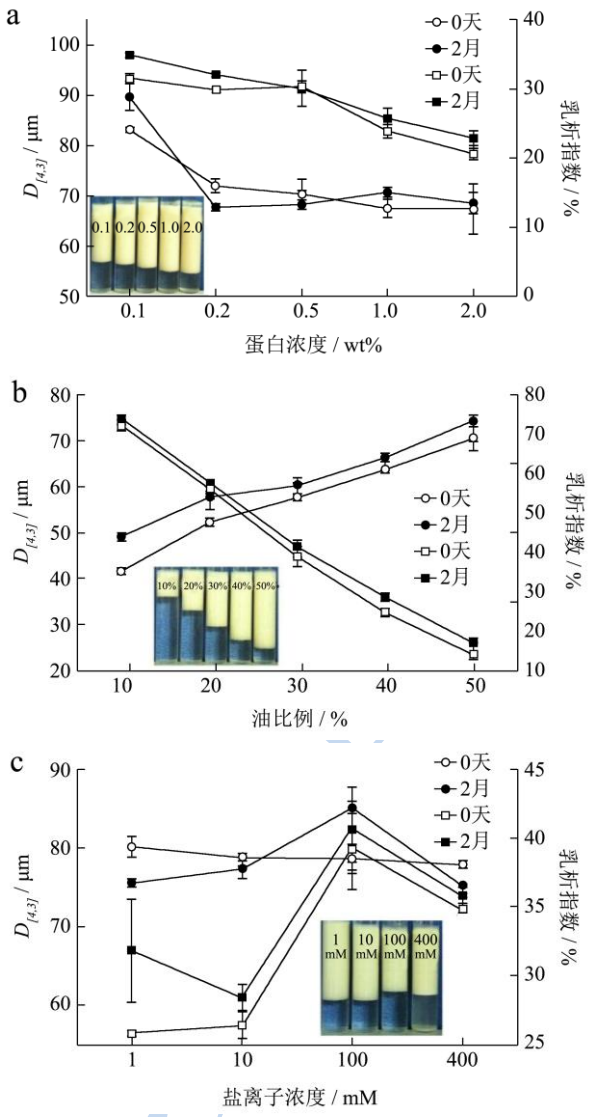


图 5 pH 5.0 时影响 SPI 乳液稳定因素

Fig.5 The effects of SPI concentration(a), oil fraction(b) and salt ionic concentration (c) on the stability of SPI emulsions prepared at pH 5.0

注：a-SPI浓度；b-油添加量；c-盐离子浓度；插图为乳液外观图片。

随着 SPI 浓度的增加，新鲜制备乳液的液滴粒径也随之变降低；两个月后液滴粒径基本保持不变，乳析指数也只是略有增加。SPI 浓度提高，就会有足够多的蛋白吸附到油水界面上，形成较厚的界面膜层，使乳液液滴以较小的半径存在，故两个月前后乳液粒径没有显著变化。

随着油的比例增加，所得乳液的乳析指数逐渐降低，而其液滴粒径显著增加。储藏两个月后，这两项指标均有所增加。油的添加比例升高，体系中就会出现更多的油-水界面，管中乳液层体积增加，清水层体积减小。且当体系中蛋白含量一定而油比例较高时，乳液就会形成较大粒径的液滴，使液滴平均粒径增大。此外，清水的析出，使得管中上部乳液层粘度增加，降低了液滴的流动性，避免了乳滴之间相互碰撞而发生聚集、絮凝等失稳现象，故能以较稳定的状态存在。

添加不同浓度的盐离子对新鲜制备乳液液滴的粒径没有显著影响。同时，盐离子的加入会产生静电屏蔽作用，使液滴表面所带电荷减少，由于 pH5.0 时蛋白本身所带电荷量很少，因此静电屏蔽作用对乳液粒径无显著的影响。

纵观 SPI 浓度、油添加比例和盐离子浓度对 pH5.0 时制得 SPI 乳液的影响，储藏两个月前后乳析指数虽有小幅增加，但其液滴粒径基本保持不变，说明 pH5.0 时制得乳液也具有较好的储藏稳定性。

3 结论

接近等电点时（pH 5.0）SPI 溶解性要远差于中性条件下（pH 7.0）SPI 的溶解性。然而，在一定浓度条件下，pH 5.0 较之中性条件下大豆蛋白分子具有更强的提高油水界面表面压（π）的能力。同时，pH 5.0 时制得大豆蛋白乳液的界面蛋白含量高达 87.03±1.28%，是中性条件乳液界面蛋白含量的 2 倍之多。此外，对比两个月前后乳液的液滴粒径及乳析指数变化，接近等电点制备的大豆蛋白乳液比中性条件下的乳液具有更好的稳定性。SPI 浓度、油添加比例和盐离子浓度对 pH 5.0 乳液粒径和乳析指数影响的研究表明，放置两个月后乳液乳析指数虽有小幅度增加，但乳液液滴粒径却基本保持不变。由此可见，等电点条件下制备的大豆蛋白乳液也表现出了良好的储藏稳定性。

参考文献

[1] 张根生,岳晓霞,李继光,等.大豆分离蛋白乳化性影响因素的研究[J].食品科学,2006,27(7):48-51
ZHANG Gen-sheng, YUE Xiao-xia, LI Ji-guang, et al .Study on affecting factors of emulsification properties of soy protein isolate [J]. Food Science, 2006, 27(7): 48-51

[2] 王金梅.大豆蛋白热聚集行为及界面、乳化性质研究[D].广州:华南理工大学,2012
WANG Jin-mei. Thermally aggregation behaviors, interfacial and emulsifying properties of soy protein[D]. Guangzhou: South China university of Technology , 2012

[3] 郭兴凤,慕运动,阮诗丰.不同测定方法对大豆分离蛋白乳化性测定结果的影响[J].食品研究与开发,2007,28(2):129-131
GUO Xing-feng, MU Yun-dong, RUAN Shi-feng. Effect of different measurement methods on the results of emulsifying properties of soy protein isolate [J]. Food Research and Development, 2007, 28(2): 129-131

[4] 黄友如,华欲飞,裘爱泳.大豆分离蛋白功能性质及其影响因素[J].粮食与油脂,2003,3:12-15
HUANG You-ru, HUA Yu-fei, QIU Ai-yong .Functional properties of soy protein isolate and affecting factors [J]. Cereals & Oils, 2003(3): 12-15

[5] 孙燕婷,黄国清,孙萍,等.大豆分离蛋白溶解性和乳化性影响因素研究[J].粮油食品科技,2011,19(1):32-35
SUN Yan-ting, HUANG Guo-qing, SUN Ping, et al. Factors affecting the solubility and emulsifying property of soy protein isolate [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2011, 19(1): 32-35

[6] Liu F, Tang C H. Soy protein nanoparticle aggregates as pickering stabilizers for oil-in-water emulsions [J]. Journal of Agricultural and food Chemistry, 2013, 61: 8888-8898

[7] de Folter J W J, van Ruijvena M W M, Velikov K P. Oil-in-water pickering emulsions stabilized by colloidal particles from the water-insoluble protein zein [J]. Soft Matter, 2012, 8: 6807-6816

[8] Palazolo G G, Sorgentini D A, Wagner J R, et al. Emulsifying properties and surface behavior of native and denatured whey soy proteins in comparison with other proteins. Creaming stability of oil-in-water emulsions [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2004, 81: 625-632

[9] Wan Z L, Wang L Y, Wang J M, et al. Synergistic interfacial properties of soy protein stevioside mixtures: Relationship to emulsion stability [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 127-135

[10] Zhang J B, Wu N N, Yang X Q, et al. Improvement of emulsifying properties of Maillard reaction products from β-conglycinin and dextran using controlled enzymatic hydrolysis [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28: 301-312

现代食品科技