

酶解产物浓度和油相体积分数对甘薯蛋白酶解产物乳化特性的影响

崔珊珊^{1,2}, 木泰华¹, 张苗¹, 孙红男¹, 陈井旺¹

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

(2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 本文研究了酶解产物浓度 (0.10%、0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00%, *m/V*) 和油相体积分数 (5%、15%、25%、35% 和 45%, *V/V*) 对超高压下酶解制得甘薯蛋白酶解产物乳化液显微结构、乳化颗粒平均粒径 ($d_{4,3}$)、乳化活性指数 (EAI)、乳化稳定性指数 (ESI) 和流变学性质的影响。当酶解产物浓度较低和油相体积分数较高时, 乳化液的乳化颗粒均一细小。增加甘薯蛋白酶解产物浓度会使其乳化液的 $d_{4,3}$ 、EAI 和 ESI 均逐渐降低; 相反, 增加油相体积分数会使乳化液的 $d_{4,3}$ 逐渐减小, EAI 逐渐增大, 而 ESI 则先降低后增加 ($p < 0.05$)。在酶解产物浓度低和油相体积分数高时, 乳化液的初始表观粘度较大, 且在 $1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 的剪切速率范围内均表现出了剪切变稀现象。酶解产物浓度和油相体积分数与乳化液的 $d_{4,3}$ 、EAI、ESI 和流变学性质密切相关, 是影响甘薯蛋白酶解产物乳化特性的重要因素。

关键词: 甘薯蛋白; 酶解产物浓度; 油相体积分数; 乳化特性

文章编号: 1673-9078(2017)3-203-209

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.3.031

Effects of Hydrolysate Concentrations and Oil Volume Fractions on the Emulsifying Properties of Sweet Potato Protein Hydrolysates

CUI Shan-shan^{1,2}, MU Tai-hua¹, ZHANG Miao¹, SUN Hong-nan¹, CHEN Jing-wang¹

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. College of Food and Pharmaceutical Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The effects of hydrolysate concentrations (0.10%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.00%, *m/V*) and oil volume fractions (5%, 15%, 25%, 35% and 45%, *V/V*) on the microstructure, average particle size ($d_{4,3}$), emulsifying activity index (EAI), emulsion stability index (ESI), and rheological properties of the emulsion of sweet potato protein hydrolysates prepared under high pressure were evaluated. When the hydrolysate concentration was low and the oil volume fraction was high, the particles of emulsion were uniform and small. An increase in the protein concentration resulted in a gradual decrease in the $d_{4,3}$, EAI and ESI of the emulsions. However, an increase in the oil volume fraction led to a gradual reduction of $d_{4,3}$, and a gradual increase in the EAI of the emulsion. ESI initially increased but was then reduced ($p < 0.05$). When the hydrolysate concentration was low and the oil volume fraction was high, the initial apparent viscosity of the emulsion was also high, exhibiting the phenomenon of shear thinning within the shear rate range of $1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$. The hydrolysate concentration and the oil volume fraction were closely related to the $d_{4,3}$, EAI, ESI, and rheological properties of the emulsion. These were the important factors affecting the emulsifying property of sweet potato protein hydrolysates.

Key words: sweet potato protein; hydrolysate concentration; oil volume fraction; emulsifying property

收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31371878); 现代农业产业技术体系建设专项 (GARS-11-B-19)

作者简介: 崔珊珊 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与综合利用

通讯作者: 木泰华 (1964-), 男, 博士生导师, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养

乳化性是两种及以上互不相溶的液体 (例如油和水) 经过机械搅拌等形成乳状液的性质。天然大分子与低分子量表面活性剂是两大类制备食品级水包油型乳状液的乳化剂^[1]。蛋白是一种天然大分子两亲物质, 与水 and 脂质都能发生相互作用。在水包油型乳化液体中, 蛋白油水两亲的性质使其在油水界面形成吸附层, 可稳定乳状液, 是优良的乳化剂。然而, 蛋白过

大的分子量反而会影响其乳化特性。因此,通过蛋白改性,将其降解为小分子量的酶解产物可能会提高其乳化特性^[1-3]。

目前,蛋白质改性方法包括化学改性、物理改性、酶法改性和基因工程改性等。其中,酶法改性和物理改性的安全性优于化学改性^[2]。酶法改性是最常用的蛋白改性方法,其是利用蛋白酶的内切和/或外切作用将蛋白分子切割成小分子肽,从而改变其功能特性。超高压处理是指以水或其它流体介质作为媒介,使用100 MPa以上的压力(一般是静水压,100~1000 MPa)对食品物料进行处理的方法。超高压处理可使蛋白构象发生改变,从而促进酶解产物的生成,并有效改善蛋白的功能特性,如乳化特性等^[4,5]。Khan等^[6]采用超高压处理对甘薯蛋白的改性研究发现,超高压处理可显著提高甘薯蛋白的乳化性。Kong等^[7]研究了酶解对麦谷蛋白酶解产物功能特性的影响,结果发现乳化性随着酶解的发生呈现先上升后下降的趋势。因此,采用酶法结合超高压技术可能会提高蛋白的乳化性。

蛋白质及其酶解产物的乳化特性受到许多因素影响,其中油相体积分数和蛋白浓度等内部因素对乳化液的稳定性影响很大。在先前的研究中,已有许多蛋白或酶解产物浓度和油相体积分数对蛋白或酶解产物乳化特性及相关性质的影响研究^[8-11]。Chen等^[8]研究超声处理后大豆分离蛋白酶解产物的乳化特性时,测定了乳化剂浓度对其乳化颗粒粒径的影响,结果表明不同处理产物的乳化颗粒粒径达到稳定时所需乳化剂即酶解产物的浓度不同。Chen等^[9]发现,酶解产物浓度对挤压结合酶解处理大豆分离蛋白酶解产物的乳化颗粒粒径有显著影响。Dickinson等^[10]研究了油相体积分数为10%、35%和45%时酪蛋白酸钠乳化液的流变行为,结果表明油相体积分数对乳化液的流变行为有极大影响。Binks等^[11]研究显示,随着油相体积分数的增加,乳化液的聚结现象更加普遍,导致乳化液滴的粒径增大。然而,目前关于酶解产物浓度和油相体积分数对超高压下酶解的甘薯蛋白酶解产物乳化特性影响的研究尚未见报道。因此,本研究通过观察不同酶解产物浓度和油相体积分数对甘薯蛋白酶解产物乳化活性、乳化稳定性、微观结构、乳化颗粒粒度以及乳化液表观粘度的影响,以期探索酶解产物浓度和油相体积分数对甘薯蛋白酶解产物乳化特性的影响机制。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

实验所用甘薯(徐薯22)由河北农林科学院提供,采收时间为2013年10月。玉米油购于当地超市。木瓜蛋白酶、牛血清蛋白、脱氧胆酸钠(sodium deoxycholate, DOC)、1-苯胺基-8-萘磺酸(8-Anilino-1-naphthalenesul-fonic acid ammonium salt, ANS)和福林酚,购于Sigma公司。十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)、酒石酸钠、叠氮化钠、磷酸氢二钠和柠檬酸购于北京化学试剂厂,所有试剂均为分析纯。

1.2 实验设备

管式离心机:GQLB-Z,辽宁阳光制药机械有限公司;高速离心机:TGL-16M型,湖南湘仪仪器厂;冷冻干燥机:SIM-FD5,金西盟(北京)仪器有限公司;实验室用膜分离设备:DF4010,上海迪清过滤技术有限公司;超高压设备:L2-600/2,天津市华泰森淼生物工程技术有限公司;高速分散均质机:FJ-200型,上海标本模型厂;光学显微镜:CX41,日本Olympus公司;激光粒度分析仪:BT9300H,丹东百特仪器有限公司;紫外可见分光光度计:TU-1810,北京普析通用仪器责任有限公司;流变仪:Physical MCR 301,奥地利安东帕有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 甘薯蛋白的制备

参考Mu等^[12]的方法。将新鲜甘薯挑选后清洗,每1 kg甘薯中加入1 L、0.01%的NaCl溶液进行护色,用打浆机打浆。将浆液经80目的双层纱布过滤,滤液静置12 h后收集上清液,用管式离心机10000 g离心40 min去沉淀。经过酸沉(pH 4.0)碱溶(pH 8.0)获得甘薯蛋白液,冻干后即得甘薯蛋白粗粉。将甘薯蛋白粗粉加蒸馏水回溶(pH 7.0),在室温下10000 g离心60 min,取上清液加三倍于初始体积的蒸馏水,经10000 u的膜超滤3次获得蛋白清液,冻干后即得精制甘薯蛋白。

1.3.2 基本成分分析

甘薯蛋白中的蛋白质、灰分和粗脂肪含量均采用AOAC 2000的方法进行测定,分别为AOAC 955.04、AOAC 923.03和AOAC 960.39。水分含量测定采用干燥恒重法(105 ℃)。总淀粉含量利用淀粉试剂盒(Megazyme, Ireland)进行测定,参照AOAC 2000 996.11的方法进行。

1.3.3 超高压下甘薯蛋白酶解产物的制备

用Tris-HCl缓冲液(pH 7)配制浓度为3% (m/V)的甘薯蛋白溶液,以酶与底物浓度比为3% (m/m)的

比例加入 Papain, 于 300 MPa、55 °C 条件下分别酶解不同时间 (2、4、6、8 和 10 min) 后, 立即于 100 °C 水浴加热 10 min 使酶失活, 冷却后于室温下 5000 g 离心 10 min。将所得上清液冻干, -20 °C 冷藏备用。

1.3.4 乳化液的制备

分别配制酶解产物浓度为 0.10%、0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00% (*m/V*) 五个浓度的甘薯蛋白溶液。分别取 7.5 mL 不同浓度的蛋白酶解产物溶液与 2.5 mL 玉米油混合, 然后用带有 12 mm 工作头的高速机械均质机在 19000 r/min 条件下均质 60 s 得新鲜乳化液备用。配制酶解产物浓度为 0.1% (*m/V*) 的甘薯蛋白酶解产物溶液, 分别取 0.5、1.5、2.5、3.5 和 4.5 mL 的蛋白酶解产物溶液加入玉米油至 10 mL, 同样条件下均质。

1.3.5 乳化液的微观结构

参照付婷婷^[15]的方法。乳化液均质后, 立即从试管底部吸取 10 μL 乳化液, 滴在载玻片上, 用盖玻片轻轻盖上。置于光学显微镜下, 放大 200 倍观察并拍照。

1.3.6 乳化颗粒粒度分布

用移液枪吸取 0.2 mL 试管底部的新鲜乳化液加入 5 mL 的 1.0% (*m/V*) SDS 溶液中, 用漩涡混合仪混匀, 然后用激光粒度分析仪测定乳化液乳化颗粒的粒度分布。乳化颗粒粒径分布由体积等效平均粒径 ($d_{4,3}$) 表示。

1.3.7 乳化特性的测定

参照 Cameron 等^[16]修正的 Pearce 等^[17]的比浊法。样品经均质后立刻从试管底部吸取 20 μL 新鲜乳化液加入到 5 mL 的 0.1% (*m/V*) SDS 溶液中, 用漩涡混合仪混匀 (5 s), 采用分光光度计在 500 nm 处测定吸光值。EAI 按照下式计算:

$$EAI(m^2/g) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times \text{稀释倍数}}{c \times l \times (1 - \varphi) \times 10000}$$

式中: A_0 表示 500 nm 处的吸光值; C 表示蛋白酶解产物溶液的浓度, (g/mL); l 表示光程为 0.01 m; φ 表示油相体积分数; 稀释倍数是 250。

均质后的乳化液静置 10 min, 从试管的底部吸取 20 μL 乳化液加入到 5 mL 的 0.1% SDS 溶液中, 同样用漩涡混合仪混匀 (5 s), 在 500 nm 处测定吸光值。ESI 按照下式计算:

$$ESI(\text{min}) = \frac{A_0}{A_0 - A_{10}} \times t$$

式中: A_0 和 A_{10} 分别表示乳化液静置 0 min 和 10 min 后的吸光值; t 为静置时间 10 min。

1.3.8 表观粘度的测定

参照郭庆等^[18]的方法。通过剪切型流变仪来测定乳化液的表观粘度。流变仪需装配有椎体和平板模头, 椎体的直径为 50 mm, 椎角为 1°, 测定温度在 25±0.1 °C。

1.3.9 统计分析

每个实验至少做三次平行, 数据用 SAS 9.2 统计软件进行方差分析, 以 $p < 0.05$ 为显著性检验标准。

2 结果与讨论

2.1 甘薯蛋白的基本成分

如表 1 所示, 甘薯蛋白的纯度为 88.28%, 其它杂质成分主要为淀粉、脂肪、灰分和水分。

表 1 甘薯蛋白主要成分 (% , 干基)

Table 1 Main components of sweet potato protein

成分	蛋白质	淀粉	脂肪	灰分	水分
含量	88.28±0.29	0.50±0.06	1.44±0.02	3.48±0.03	4.58±0.01

2.2 乳化液的微观结构

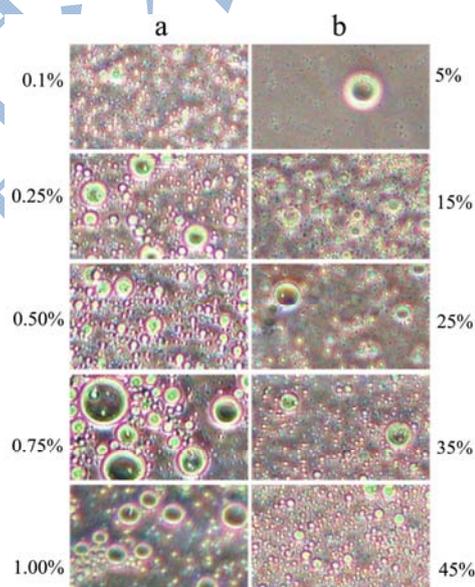


图 1 不同酶解产物浓度 (a, 油相体积分数为 25%, *V/V*) 和不同油相体积分数 (b, 酶解产物浓度为 1.0%, *m/V*) 的乳化液显微结构

Fig.1 Microstructure for emulsions with different concentrations of peptides (a, oil volume fraction: 25%, *V/V*) and different oil volume fractions (b, protein hydrolysates: 0.1%, *m/V*)

不同酶解产物浓度的甘薯蛋白酶解产物乳化液的显微结构如图 1a 所示。在酶解产物浓度为 0.1% (*m/V*) 时, 乳化液的乳化颗粒细小、分布均一, 且无聚集现象。随着酶解产物浓度的增加 (0.25%~1.00%, *m/V*), 乳化颗粒的大小差异明显增大, 呈现出不均一的状态。

从图中可以看出,当酶解产物浓度高于 0.75%时,乳化颗粒开始出现聚集现象。

图 1b 为不同油相体积分数 (5%~45%, *V/V*) 的甘薯蛋白酶解产物乳化液的显微照片。随着油相体积分数的增大,乳化颗粒的密集程度明显增加,且乳化液滴的大小逐渐变得均一细小。在相同视野范围内,油相体积分数为 5%时只出现一个较大的乳化颗粒;而当油相体积分数达到 45%时,均一细小的乳化液滴充满整个视野范围。由此可见,油相体积分数可以显著影响甘薯蛋白酶解产物液的乳化液滴颗粒形态。随着油相体积分数的增加,乳化液滴趋于细小均一,被蛋白酶解产物覆盖的油滴排列更加紧密,这可能与油滴表面的静电斥力有关^[19]。

2.3 乳化颗粒粒径

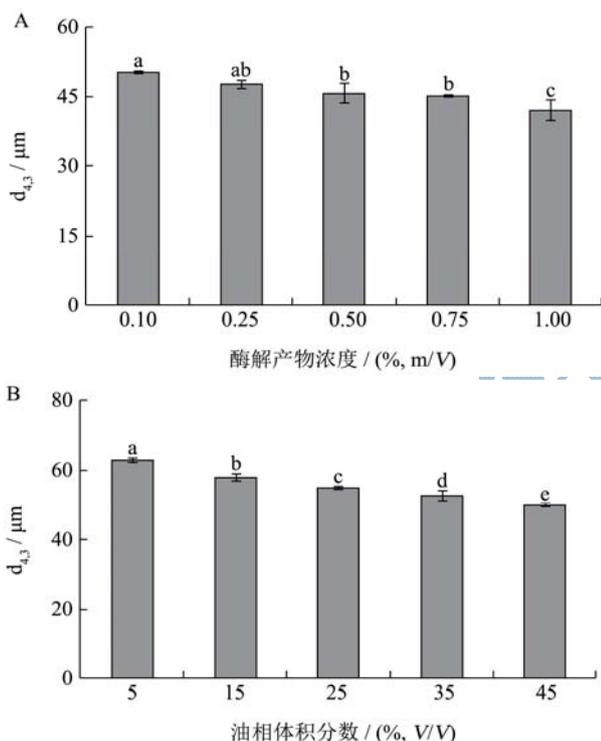


图2 酶解产物浓度 (A) 和油相体积分数 (B) 对乳化颗粒平均粒径 ($d_{4,3}$) 的影响

Fig.2 Effect of concentrations of peptides (A) and oil volume fractions (B) on the average size of emulsified particles ($d_{4,3}$)

乳化液的乳化颗粒粒径 ($d_{4,3}$) 是衡量乳化液乳化特性的一个重要指标。酶解产物浓度和油相体积分数对 $d_{4,3}$ 的影响如图 2 所示。

图 2A 所示为酶解产物浓度 (油相体积分数为 25%) 对乳化颗粒 $d_{4,3}$ 的影响。甘薯蛋白酶解产物乳化液乳化颗粒的 $d_{4,3}$ 随蛋白酶解产物浓度的增加逐渐下降 (图 2A)。酶解产物浓度为 0.10% 时, 乳化液滴的 $d_{4,3}$ 最大, 为 50.06 μm 。随着酶解产物浓度的增高,

乳化颗粒的 $d_{4,3}$ 逐渐降低, 当酶解产物浓度为 1.00% 时, 乳化颗粒的 $d_{4,3}$ 最小为 41.89 μm 。上述结果表明随着蛋白酶解产物浓度的增加, 乳化颗粒的均一程度显著降低。Qian 等^[20]研究高分子生物乳化剂在用橙油作为油相的水包油乳化液的形成和稳定过程中的乳化行为时, 也发现随着 β -乳球蛋白浓度的增加, 乳化颗粒的 $d_{4,3}$ 也逐渐下降, 主要原因是更多的乳化剂可以使界面饱和更快, 并且覆盖所有均质过程中形成的界面。

油相体积分数 (酶解产物浓度为 0.1%) 对乳化液 $d_{4,3}$ 的影响如图 2B 所示。不同油相体积分数的乳化液颗粒的 $d_{4,3}$ 差异显著。随着油相体积分数的增加 (5%~45%), 乳化液滴的 $d_{4,3}$ 由 62.73 μm 逐渐减小至 49.81 μm 。图 2B 的结果与图 1b 相同, 油相体积分数的增加反而使乳化液平均粒径减小。

2.4 乳化活性

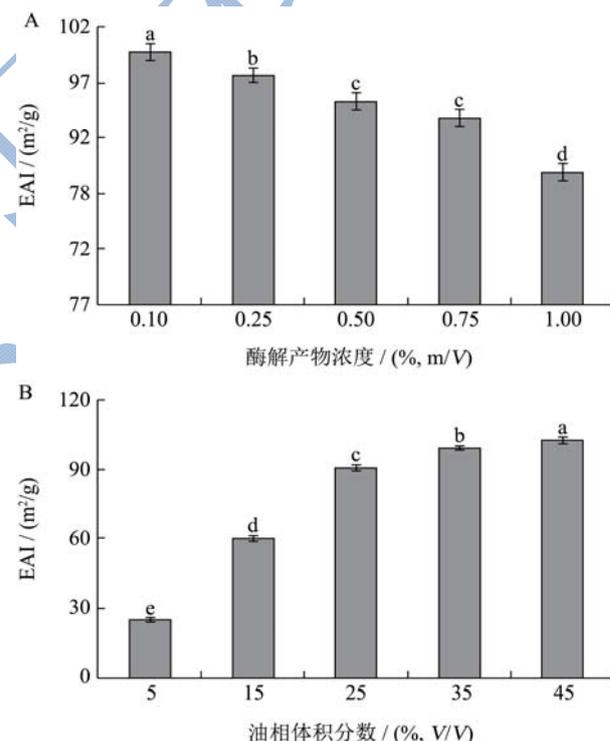


图3 酶解产物浓度 (A) 和油相体积分数 (B) 对甘薯蛋白酶解产物乳化活性的影响

Fig.3 Effect of concentrations of peptides (A) and oil volume fractions (B) on the emulsifying activity of sweet potato peptides

如图 3A 所示, 随着蛋白酶解产物浓度的增加, 甘薯蛋白酶解产物乳化液的 EAI 显著地减小 ($p < 0.05$)。在蛋白酶解产物浓度为 0.1% (*m/V*) 时, EAI 最大为 99.81 m^2/g ; 而当蛋白酶解产物的浓度增加到 1% 时, 甘薯蛋白酶解产物的乳化液减小到 88.79

m^2/g 。因而,甘薯蛋白酶解产物浓度的增大对乳化活性有不利影响。Chicón 等^[21]研究了 400 MPa 下乳清蛋白的胃蛋白酶酶解产物的乳化特性,结果显示随着酶解产物浓度的增大(0.25%~1.50%),乳化液的 EAI 降低。这种现象可能归因于蛋白酶解产物浓度较低时,均质后通过自由扩散,蛋白酶解产物可迅速吸附至油水界面;而在蛋白酶解产物浓度较高时,活化能垒则阻止了蛋白酶解产物在均质后快速的自由扩散,降低了其吸附效率,从而使乳化液的 EAI 降低^[22-23]。

从图 3B 中可以看出,甘薯蛋白乳化液的 EAI 随着油相体积分数的增大而显著升高。当乳化液的油相体积分数只有 5% (V/V) 时, EAI 为 $25.33 \text{ m}^2/\text{g}$; 当油相体积分数达到 45% (V/V) 时,甘薯蛋白酶解产物乳化液的 EAI 最大为 $102.87 \text{ m}^2/\text{g}$ 。油相体积分数能显著影响甘薯蛋白酶解产物的乳化活性,且油相体积分数越大乳化液的 EAI 越大。油相体积分数较小时,乳化液的 EAI 较小;而油相体积分数较高时,乳化液的 EAI 也较大(图 3B)。其原因与蛋白浓度较低时相同,与蛋白酶解产物的自由扩散运动相关。相比于油相体积分数小时,油相体积分数大时每单位重量的甘薯蛋白酶解产物可以形成更大的油相表面积^[24]。

2.5 乳化稳定性

蛋白酶解产物浓度对甘薯蛋白酶解产物乳化液稳定性的影响如图 4A 所示,随着甘薯蛋白酶解产物浓度的升高,乳化液稳定性逐渐降低。蛋白酶解产物浓度从 0.1% 逐渐增加到 1.00% 时,甘薯蛋白酶解产物乳化液的 ESI 从 21.15 min 逐渐降低到 13.49 min,这表明提高蛋白酶解产物的浓度会降低乳化液的稳定性。随着蛋白酶解产物浓度的增加,乳化液的稳定性降低,这与余东华^[25]对猪皮蛋白酶解产物的乳化稳定性随其浓度变化的研究结果一致。

图 4B 显示的是油相体积分数对乳化液 ESI 的影响。当蛋白酶解产物的浓度为 0.1%,油相体积分数为 5% 时,乳化液的 ESI 最高,为 30.41 min。当油相体积分数大于 5% 时,乳化液的 ESI 显著降低;但随着油相体积分数的增大(15%~45%),ESI 呈逐渐升高的趋势。当油相体积分数增加到 45% 时,ESI 从 15% 时的 17.83 min 增大到 22.26 min。由此可见,油相体积分数是影响乳化液的稳定性的一个重要因素。当油相体积分数为 5% 时,乳化液的 ESI 最高(图 4B),这可能是因为乳化液液滴稀疏,彼此之间相互作用较弱,不易发生聚集或絮凝。而当油相体积分数从 15% 增加到 45% 时(图 4B),乳化液的稳定性有逐步增加的趋势,相同的现象在郭兴凤研究大豆分离蛋白的乳

化稳定性时也被观察到,当油相体积分数在 25%~50% 时,乳化液下部的水层清澈,乳化层结构致密且上部无油相析出,各层的界面也比较清晰^[26]。

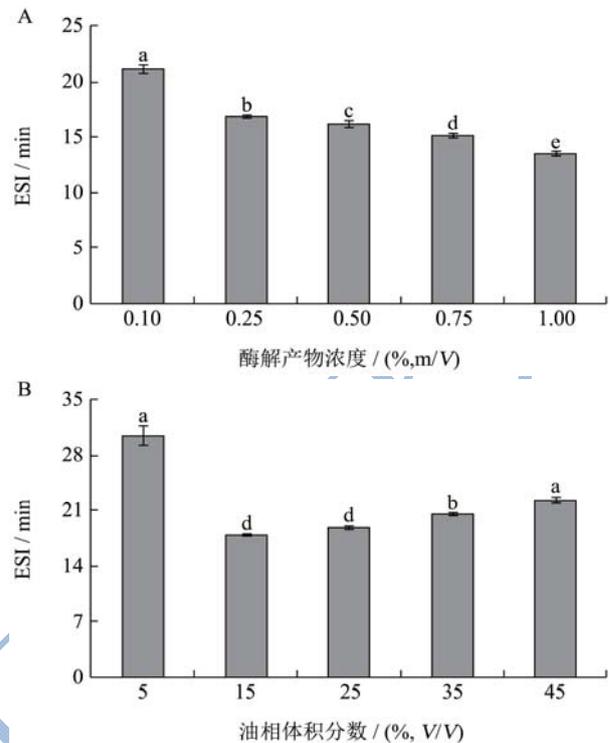


图4 酶解产物浓度(A)和油相体积分数(B)对甘薯蛋白酶解产物乳化稳定性的影响

Fig.4 Effect of concentrations of peptides (A) and oil volume fractions (B) on the emulsifying stability of sweet potato peptides

2.6 流变学性质

蛋白酶解产物浓度和油相体积分数对甘薯蛋白酶解产物乳化液表观粘度的影响如图 5 所示。在图 5a 中可以看到,当油相体积分数为 25% 时,在设定的剪切速率范围内 ($1\sim 100 \text{ s}^{-1}$),不同蛋白酶解产物浓度的乳化液随着剪切速率的增大表观粘度逐渐减小,表现出了不同程度的剪切变稀现象。蛋白酶解产物浓度为 0.1% 时,乳化液的初始表观粘度最大,为 $77.10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。在蛋白酶解产物浓度较低时,初始表观粘度较高,使乳化液中的油滴不易随着时间的推移而继续扩散,有利于乳化液保持稳定状态。当蛋白酶解产物浓度增加时,乳化液的初始表观粘度显著减小,乳化液中油滴的扩散运动较浓度低时更加剧烈,使乳化液随着时间的增加趋于不稳定得状态^[27]。

当蛋白酶解产物浓度为 0.1% 时,油相体积分数对乳化液表观粘度的影响如图 5b 所示。油相体积分数为 45%,乳化液的初始表观粘度最大为 $1165 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,且乳化液剪切变稀现象非常明显。而在油相体积分数为

5%和15%时,乳化液剪切变稀的程度则较低。甘薯蛋白酶解产物乳化液的表现粘度在油相体积分数高时较大,而较高的表现粘度会阻碍油滴的运动,因而降低了油滴之间碰撞的频率^[28]。这也是乳化液的ESI在油相体积分数较高时比较大的一个影响因素。

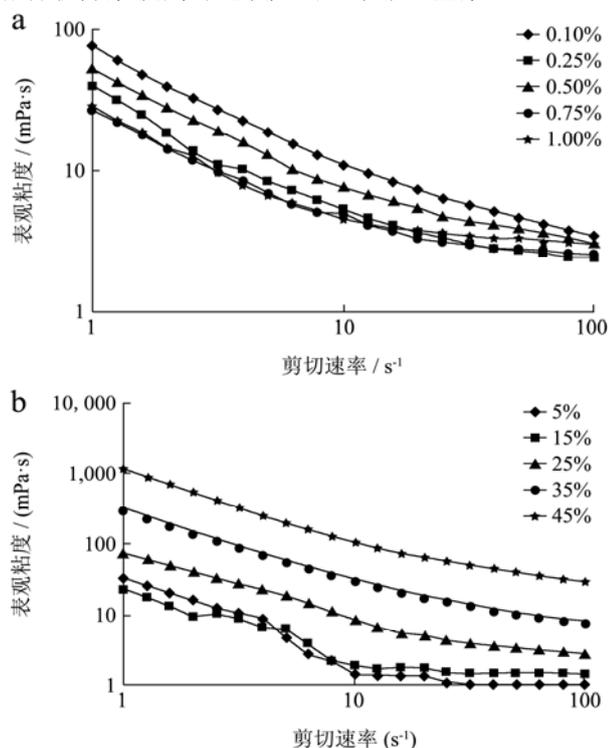


图5 酶解产物浓度(a)和油相体积分数(b)对乳化液不同剪切速率下表现粘度的影响

Fig.5 Effect of concentrations of peptides (a) and oil volume fractions (b) on the apparent viscosity of emulsions as a function of shear rate

3 结论

甘薯蛋白酶解产物浓度的升高,会导致甘薯蛋白酶解产物乳化液的 $d_{4,3}$ 、初始表现粘度、EAI和ESI降低。油相体积分数的增加,会使甘薯蛋白酶解产物乳化液的 $d_{4,3}$ 降低、初始表现粘度和EAI升高,而ESI则先降低后升高。同时,甘薯蛋白酶解产物乳化液的 $d_{4,3}$ 、表现粘度与其乳化活性和乳化稳定性密切相关。综上,本研究为甘薯蛋白酶解产物作为乳化剂在食品领域中的潜在应用提供了宝贵基础信息。

参考文献

[1] 王盼盼.食品中蛋白质的功能特性综述[J].肉类研究,2010,5:62-71
WANG Pan-pan. Functionality of food protein [J]. Meat Research, 2010, 5: 62-71

[2] 杨雷,仇丹,王佐杨,等.食品级水包油型乳状液的研究进展

[J].宁波工程学院学报,2013,25(1):43-48

YANG Lei, QIU Dan, WANG Zuo-Yang, et al. Research progress in food-grade oil-in-water emulsion [J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2013, 25(1): 43-48

[3] 柴华,赵谋明,王金水.食品蛋白质酶解改性提高功能特性的研究进展.食品工业科技,2008,29(1):286-288

CHAI Hua, ZHAO Mou-Ming, WANG Jin-Shui. Research progress of enhancing the functionality of food proteins by enzymatic modification [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(1): 286-288

[4] 孙冰玉,石彦国,朱会芳.木瓜蛋白酶提高醇法大豆浓缩蛋白乳化性的研究[J].食品科学,2006,27(12):505-508

SUN Bing-yu, SHI Yan-guo, ZHU Hui-fang. Modifying alcohol leaching soy protein concentrate to improve emulsibility by papain [J]. Food Science, 2006, 27(12): 505-508

[5] 王章存,徐贤.超高压处理对蛋白质结构及功能性质影响[J].粮食与油脂,2007,11:10-12

WANG Zhang-cun, XU Xian. Effect of ultrahigh pressure disposal on protein structure and property [J]. Cereals & Oils, 2007, 11: 10-12

[6] Khan N M, Mu T H, Zhang M, et al. The effects of pH and high hydrostatic pressure on the physicochemical properties of a sweet potato protein emulsion [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 48(6): 209-216

[7] Kong X Z, Zhou H M, Qian H F. Enzymatic preparation and functional properties of wheat gluten hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2007, 101(2): 615-620

[8] Chen L, Chen J, Ren J, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymatic hydrolysis of soy protein isolates and on the emulsifying properties of hydrolysates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6): 2600-2609

[9] Chen L, Chen J, Ren J, et al. Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improved emulsifying properties [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 887-897

[10] Dickinson E, Golding M. Rheology of sodium caseinate stabilized oil-in-water emulsions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 191(1): 166-176

[11] Binks B P, Whitby C P. Silica particle-stabilized emulsions of silicone oil and water: aspects of emulsification [J]. Langmuir, 2004, 20(4): 1130-1137

[12] Mu T H, Tan S S, Xue Y L. The amino acid composition, solubility and emulsifying properties of sweet potato protein

- [J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 1002-1005
- [13] Markwell M A K, Haas S M, Bieber L L, Tolbert N E. A modification of the Lowry procedure to simplify protein determination in membrane and lipoprotein samples [J]. Analytical Biochemistry, 1978, 87(1): 206-210
- [14] Peterson G L. A simplification of the protein assay method of Lowry et al. which is more generally applicable [J]. Analytical Biochemistry, 1977, 82(3): 346-356
- [15] 付婷婷.甘薯热变性蛋白限制性酶解产物制备及乳化特性研究[D].新疆农业大学,2012
FU Ting-ting. Study on emulsifying properties on hydrolysates of enzymatic hydrolysis sweet potato heat-denatured protein [D]. Xinjiang Agricultural University, 2012
- [16] Cameron D R, Weber M E, Idziak E S, et al. Determination of interfacial areas in emulsions using turbidimetric and droplet size data: correction of the formula for emulsifying activity index [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(4): 655-659
- [17] Pearce K N, Kinsella J E. Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1978, 26: 716-723
- [18] 郭庆,木泰华.氯化钙对甘薯蛋白乳化特性的影响[J].中国农业科学,2010,43(11):2340-2346
GUO Qing, MU Tai-hua. Effect of calcium chloride on emulsifying properties of sweetpotato soluble protein [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(11): 2340-2346
- [19] 杨淼.酶促大豆蛋白乳液凝胶的制备及性质研究[D].广州:华南理工大学,2012
YANG Miao. Preparation and properties of soy protein-stabilized emulsion gels induced by microbial transglutaminase [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012
- [20] Qian C, Decker E A, Xiao H, et al. Comparison of biopolymer emulsifier performance in formation and stabilization of orange oil-in-water emulsions [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(1): 47-55
- [21] Chicón R, Belloque J, Alonso E, et al. Antibody binding and functional properties of whey protein hydrolysates obtained under high pressure [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 593-599
- [22] Dagorn-Scaviner C, Gueguen J, Lefebvre J. Emulsifying properties of pea globulins as related to their adsorption behaviors [J]. Journal of Food Science, 1987, 52: 335-341
- [23] Phillips M C. Protein conformation at liquid interfaces and its role in stabilizing emulsions and foams [J]. Food Technology, 1981, 35: 50-57
- [24] 郭庆.甘薯蛋白乳化特性的研究[D].北京:中国农业科学院,2010
GUO Qing. The study on emulsifying properties of sweet potato protein [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010
- [25] 余东华.猪皮蛋白两步酶解及其产物性质研究[D].武汉:华中农业大学,2011
YU Dong-hua. Studies on the two steps enzymatic hydrolysis of pigskin protein and properties of its hydrolysate [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011
- [26] 郭兴凤,阮诗丰.影响大豆分离蛋白乳化稳定性测定的几种因素研究[J].食品研究与开发,2006,27(6):59-61
GUO Xing-feng, RUAN Shi-feng. The effect factors of the determination of emulsion stability of SPI [J]. Food Research and Development, 2006, 27(6): 59-61
- [27] 姚磊,朱秀清,许慧,等.大豆乳清蛋白乳化性的研究[J].食品科技,2008,32(11):29-32
YAO Lei, ZHU Xiu-qing, XU Hui, et al. Research on emulsification property of whey soy protein [J]. Food Science and Technology, 2008, 32(11): 29-32
- [28] 时浩.食品油脂 O/W 乳状液稳定性的研究[D].南昌:南昌大学,2010
SHI Hao. A study of food Oil-in-Water emulsions stability [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010