



刘兴丽,杨龙松,赵双丽,等. 马铃薯蛋白-黄原胶微凝胶的制备及其乳化特性研究[J]. 轻工学报,2021,36(1):1-8.

LIU X L, YANG L S, ZHAO S L, et al. Study on preparation and emulsion property of potato protein-xanthan gum microgel[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(1): 1-8. DOI:10.12187/2021.01.001

中图分类号:TS239 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)01-0001-08

马铃薯蛋白-黄原胶微凝胶的制备及其乳化特性研究

Study on preparation and emulsion property of potato protein-xanthan gum microgel

刘兴丽^{1,2,3}, 杨龙松¹, 赵双丽¹, 吴凤¹, 张华^{1,2,3}

LIU Xingli^{1,2,3}, YANG Longsong¹, ZHAO Shuangli¹, WU Feng¹, ZHANG Hua^{1,2,3}

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;

3. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南 郑州 450001

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. He'nan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China;

3. He'nan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China

关键词:

马铃薯蛋白; 黄原胶;
微凝胶; 结构表征; 乳
化特性

Key words:

potato protein;
xanthan gum;
microgel; structure
characterization;
emulsion property

摘要:以马铃薯蛋白(PP)和黄原胶(XG)为原料,通过研究不同 pH 值、热处理条件和 PP/XG 质量比确定马铃薯蛋白-黄原胶微凝胶(PP-XGM)的最佳制备条件,对该条件下制备的 PP-XGM 结构进行表征,以动力学稳定性指数(TSI)为指标对其乳化稳定性进行研究.结果表明:PP-XGM 的最佳制备条件为 PP/XG 质量比 1:1, pH 值 3.0, 80 °C 热处理 30 min;与 PP-XG 相比,PP-XGM 的粒径更大,多分散系数更小,颗粒分布更均匀;与 PP 相比,PP-XG 和 PP-XGM 的最大吸收波长 λ_{\max} 发生了不同程度的蓝移,且 PP-XGM 的荧光强度(FI)下降最显著;采用透射电镜发现 PP-XGM 呈核壳结构;在油相体积分数相同的条件下,PP-XGM 的乳化稳定性较 PP 显著提高.

收稿日期:2020-09-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31801578)

作者简介:刘兴丽(1987—),女,河南省新乡市人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为速冻食品加工与安全控制.

通信作者:张华(1975—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为速冻食品加工与安全控制.

Abstract: Potato protein (PP) and xanthan gum (XG) were used as raw materials. The optimal preparation conditions of xanthan gum microgel (PP-XGM) were determined through different pH value, heat treatment conditions, and potato protein/xanthan gum mass ratio. The structure of the PP-XGM prepared under this condition was characterized. The stability kinetic index was used as an indicator to study its emulsification stability. The results showed that the best preparation conditions for PP-XGM were PP/XG mass ratio of 1 : 1, pH value 3.0, and 80 °C water bath heating for 30 min. Compared with PP-XG, PP-XGM had larger particle size, smaller polydispersity coefficient and more uniform particle distribution. Compared with PP, the maximum absorption wavelength λ_{\max} of PP-XG and PP-XGM had a different degree of blue shift, and the fluorescence intensity *FI* of PP-XGM had the most significant decrease. Using projection electron microscopy, it was found that PP-XGM had a core-shell structure. Under the same oil phase volume fraction, the emulsion stability of PP-XGM was significantly higher than that of PP.

0 引言

马铃薯蛋白(PP)为马铃薯淀粉加工后的副产物^[1],其氨基酸组成比例均衡,含有大多数谷物没有的赖氨酸,营养价值可与动物蛋白媲美^[2]. PP按相对分子质量大小可分为三部分:高相对分子质量蛋白、马铃薯糖蛋白、蛋白酶抑制剂^[3]. 其中,马铃薯糖蛋白具有良好的凝胶形成性、起泡性、乳化性等功能性^[4]. 目前,我国对PP的研究较少且不深入,主要集中在淀粉废液中蛋白的分离、改性等方面.

微凝胶是通过生物大分子间的交联形成三维网络结构,同时保持大量的溶剂分子、尺寸在微米级及以下的凝胶颗粒^[5]. 微凝胶在稳定乳液等方面有着广泛的应用,其制备方法主要包括静电复合法、喷射均质法等^[6]. 其中,静电复合法是通过两种或两种以上聚合物间的静电吸引力而相互聚集,如通过阴离子多糖与带正电的蛋白质静电复合制备微凝胶. B. Yin等^[7]利用大豆蛋白与大豆多糖,在pH值为3.5时所制备的静电复合物具有良好的乳化能力,乳液粒径达到250 nm,经过加热后的乳液可在NaCl浓度为200 mmol/L或pH值为2~8的介质中保持稳定. T. Tran等^[8]通过研究大豆可溶性多糖对酸性大豆蛋白分散液和乳状液的稳定作用发现,二者之间相互作用的本质是静电复合,所

得静电复合物可通过空间排斥作用有效改善基于大豆分离蛋白的O/W乳液的动力学稳定性. 樊雪静等^[9]利用大豆分离蛋白与寡糖在pH值为6.0时制备了静电复合物,发现大豆分离蛋白-水苏糖和大豆分离蛋白-棉子糖的乳化稳定性比大豆分离蛋白分别提高了132.40%和116.00%. 以上研究表明,采用静电复合法制备的凝胶复合物可有效改善乳液的稳定性.

目前,与微凝胶相关的蛋白研究主要集中在蛋清蛋白、大豆蛋白等,而关于PP与多糖静电复合的研究未见报道. 黄原胶属于阴离子多糖,在较低浓度时会形成不受温度、盐浓度变化影响的黏性溶液,与其他多糖溶液相比具有较高黏度,是一种非常有效的稳定剂. 鉴于此,本文拟采用静电复合法制备马铃薯蛋白-黄原胶微凝胶(PP-XGM),并对其结构和乳化特性进行研究,以为PP和多糖的开发利用提供一定的理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验材料

PP(蛋白质质量分数为90.01%),西安四季生物科技有限公司产. 食品级黄原胶(XG),山东阜丰发酵有限公司产;福临门大豆油,中国粮油食品集团有限公司产. 实验所用其他试剂均为分析纯.

1.2 主要仪器与设备

MS7-H550-Pro 型磁力搅拌器,龙兴创实验仪器有限公司产;FE20 Plus 型 pH 测量计,梅特勒-托利多仪器有限公司产;LGJ-50FD 型冷冻干燥机,京松源华兴科技发展有限公司产;Turbiscan Lab 型多重光散射仪,法国 Formulacion 公司产;TD5M 型低速离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司产;Nano-ZS90 型激光纳米粒度仪,英国 Malvern 公司产;FA25 型高剪切分散乳化机,德国弗鲁克流体机械制造有限公司产;UV762 型紫外分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司产;JSM-7100F 型场发射扫描电镜,日本电子公司产;F-7000 型荧光分光光度计,日本日立公司产;JEM-100CX-II 型透射电镜,日本电子株式会社产。

1.3 实验方法

1.3.1 PP-XGM 的制备 根据夏晓凤^[10]的方法,略有改动.称取一定质量的 PP(质量分数为 1.00%)和 XG(质量分数分别为 0.05%、0.10%、0.20%、1.00%),分别用去离子水进行溶解,持续搅拌 3 h,将制备好的溶液放入 4 ℃ 冰箱中过夜;将 XG 溶液加入到 PP 溶液中,持续搅拌 4 h,使用浓度为 0.1 mol/L 的 HCl 溶液将上述溶液 pH 值分别调节至 2.0~4.0,得到相应 pH 值的 PP-XG 静电复合溶液;在 80 ℃、90 ℃ 温度下,将上述静电复合溶液水浴加热不同时间后,立即放入冰水中冷却至室温,即得 PP-XGM;最后将 PP-XGM 冻干保存,备用。

1.3.2 ζ -电位的测定 在激光纳米粒度仪上进行 ζ -电位的测定.分别将冻干后的 PP-XGM 样品和马铃薯蛋白-黄原胶物理复合物(PP-XG)配成溶液,用相同 pH 值的磷酸盐缓冲液稀释到合适的质量浓度.测试温度为 25 ℃,设置平衡时间为 2 min。

1.3.3 动力学稳定性的测定 乳液的动力学稳定性由动力学稳定性指数(*TSI*)表征,乳液的

TSI 越大,表明其动力学稳定性越差;反之,乳液的 *TSI* 越小,表明其动力学稳定性越好^[11].取 7.5 mL 质量浓度为 0.001 g/mL 的蛋白微凝胶溶液,加入 2.5 mL 大豆油,用高速分散均质机于 19 000 r/min 条件下均质 120 s,得到新鲜的皮克林乳液.在近红外光源波长 880 nm,温度 25 ℃ 条件下,使用多重光散射仪对样品进行动力学稳定性测定.在仪器配套的圆柱形玻璃管中加入 20 mL 样品,每隔 25 s 扫描一次,持续扫描 1 h。

1.3.4 粒径的测定 用磷酸盐缓冲液将样品稀释至相同质量浓度,采用激光纳米粒度仪对样品的平均表观流体力学粒径和多分散系数(*PDI*)进行测定^[12],其中,*PDI* 越小,说明颗粒的分布越均匀.测定温度为 25 ℃,平衡时间为 2 min。

1.3.5 内源性荧光光谱的测定 内源性荧光光谱用于评价色氨酸残基周围的构象变化.首先将 PP、PP-XG、PP-XGM 用磷酸盐缓冲液(pH=7.0,浓度为 0.01 mol/L)稀释至质量浓度为 1 mg/mL,然后用荧光分光光度计检测溶液的内源性荧光光谱^[13].激发波长为 290 nm,扫描发射光谱范围为 300~420 nm,激发波长和发射波长狭缝宽度均为 2.5 nm。

1.3.6 微观形貌的测定 采用透射电镜观察 PP-XGM 的微观结构:取一滴样品稀释液(约 20 μ L)滴加到透射电镜专用的碳膜铜网上,吸附 15 min 后,用滤纸吸附多余部分,室温下干燥 10 min,测试的加速电压为 80 kV。

1.3.7 乳化特性的测定 取一定量的 PP-XGM 于容器中,加入浓度为 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲液(pH=7.0),将 PP-XGM 溶液的质量浓度稀释至 1 mg/mL;取 1 mL 稀释后的 PP-XGM 溶液加入 3 mL 大豆油中,用高剪切分散乳化机搅打 2 min,设置转速条件为 10 000 r/min;分别于 0 min 和 10 min 时从容器底部量取

50 μL 乳液,加入到 5 mL 质量分数为 0.1% 的十二烷基磺酸钠溶液中,充分混匀后,用紫外分光光度计测其吸光度值,波长设置为 500 nm,以 SDS 空白溶液调零^[14]. 乳液的乳化稳定性指数(ESI)计算公式如下:

$$ESI = \frac{A_{10}}{A_0} \times 100\%$$

式中, A_0 和 A_{10} 分别表示乳液静置 0 min 和 10 min 的吸光度值.

1.4 数据分析

所有实验均重复 3 次,数据用 Microsoft Excel 2016 软件处理,结果以(平均值 \pm 标准差)的形式表示. 用 Origin 8.5 软件作图、SPSS 17.0 软件进行显著性分析,采用 Duncan's 多重比较法进行显著性检验, $P < 0.05$ 为判定显著性的条件.

2 结果与分析

2.1 PP-XGM 的制备条件分析

2.1.1 pH 值范围的确定 pH 值会影响蛋白质和多糖带电基团的解离程度,进而影响二者的相互作用^[15]. 因此,在制备 PP-XGM 前,首先需要考查 pH 值对 PP 和 XG 的影响. pH 值对 PP 和 XG 的 ζ -电位的影响如图 1 所示. 由图 1 可以看出,当 pH 值为 4.3 时,PP 的 ζ -电位为 0;当 pH 值大于 4.3 时,PP 的 ζ -电位均为负值,带正电荷;当 pH 值小于 4.3 时,PP 的 ζ -电位均为正值,带负电荷. 当 pH 值在 2.0~8.0 范围内时,XG 的 ζ -电位均为负值. 随着 pH 值的增大,XG 的羧基离子化程度增加,带电量增多, ζ -电位的绝对值越来越高. 当 pH 值在 2.0~4.0 范围内时,PP 和 XG 带相反电荷,可实现二者之间有效的静电吸引作用.

2.1.2 pH 值对皮克林乳液动力学稳定性的影响 依据 2.1.1 研究结果,进一步研究 pH 值在 2.0~4.0 范围内的 PP-XGM 对乳液动力学稳定性的影响. pH 值对皮克林乳液动力学稳定

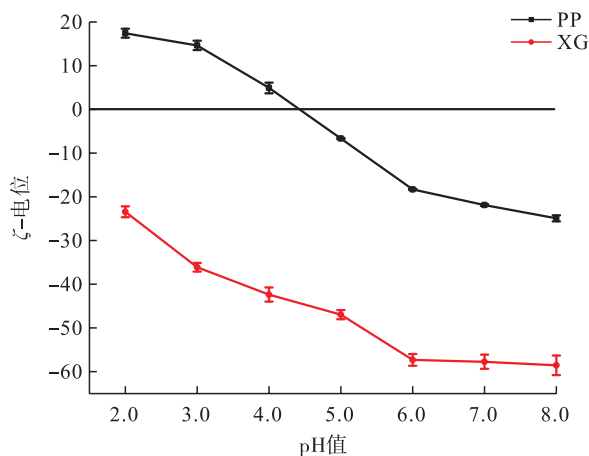


图 1 pH 值对 PP 和 XG 的 ζ -电位的影响

Fig. 1 Effect of pH value on ζ -potential of potato protein and xanthan gum

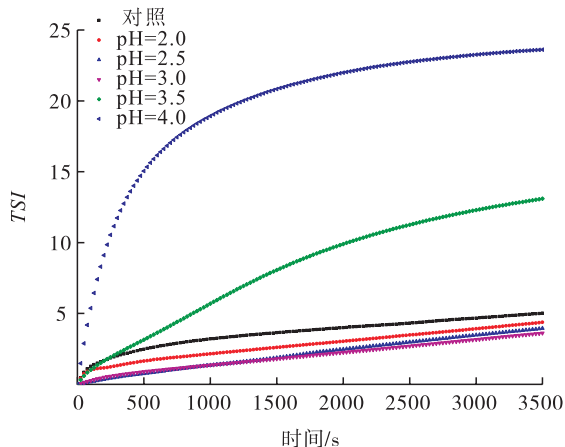


图 2 pH 值对皮克林乳液动力学稳定性的影响

Fig. 2 The effect of pH value on the dynamic stability of Pikering emulsion

性的影响如图 2 所示. 由图 2 可以看出,所有乳液样品的 TSI 均随时间的延长而不断增大,最后趋于平缓,说明时间越长,乳液越不稳定. 当 pH 值为 4.0 和 3.5 时,所制备的 PP-XGM 稳定乳液的效果远远劣于其他 pH 值下所制备的 PP-XGM. 这可能是因为此时乳液的 pH 值处在蛋白质等电点附近,PP 发生自聚集,与 XG 相互作用较弱. 当 pH 值为 3.0 时,乳液的 TSI 最低,说明该条件所制备的 PP-XGM 稳定乳液的效果较好.

2.1.3 热处理条件对皮克林乳液动力学稳定性的影响 热处理条件对皮克林乳液动力学稳定性的影响如图 3 所示. 未经热处理的 PP 与 XG 所形成的静电复合物是可逆的,在复合物溶液 pH 值高于蛋白质等电点的情况下,不能形成相互作用的聚集体. 热处理可使蛋白质分子结构被破坏,与多糖结合的位点增加,疏水基团暴露,疏水相互作用增强,同时,热处理也使多糖的构象发生改变,二者的相互作用增强^[16]. 另一方面,热处理可减少可逆反应的发生,提高聚合物的稳定性,抑制蛋白质分子间的聚集. 由图 3 可以看出,与 90 ℃ 热处理不同时间所制备的 PP-XGM 相比,80 ℃ 热处理不同时间所制备的 PP-XGM 稳定乳液的效果更好. 这可能是因为超过一定温度后,PP 变性严重,PP 与 XG 形成的微凝胶界面活性下降,从而稳定乳液的能力下降. 另外,由 80 ℃ 热处理 30 min 所制备的 PP-XGM 稳定的乳液,其 *TSI* 最低,表明其动力学稳定性最好.

2.1.4 不同 PP/XG 质量比对皮克林乳液动力学稳定性的影响 XG 的加入可增加蛋白质的润湿性、分子的伸展程度和疏水基团的暴露. 当 XG 质量分数较低时,因其不足以覆盖所有液滴,

会发生桥架絮凝现象;当 XG 质量分数过高时,又会发生排斥絮凝现象^[17]. 因此,XG 和蛋白质的质量比会影响乳液的动力学稳定性. 保持 PP 质量分数为 1.00%,溶液 pH 值为 3.0,80 ℃ 热处理 30 min,PP/XG 质量比对皮克林乳液动力学稳定性的影响结果如图 4 所示. 由图 4 可以看出,当 PP/XG 质量比为 5 : 1 时,乳液动力学稳定性最差. 这可能是因为在此 pH 值为 3.0 时,PP 所带正电荷与 XG 所带负电荷相中和,使复合物所带净电荷接近于 0,此时所形成的 PP-XGM 吸附的油滴无法抵抗吸引力而发生絮凝,乳液的 *TSI* 随之减小. 当 PP/XG 质量比分别为 20 : 1,10 : 1 和 1 : 1 时,乳液的各 *TSI* 变化曲线相近,*TSI* 均较小,其中,当 PP/XG 质量比为 1 : 1 时,乳液的动力学稳定性最好.

综上,PP-XGM 的最佳制备条件为:PP/XG 质量比 1 : 1,pH 值 3.0,80 ℃ 热处理 30 min.

2.2 PP-XGM 的结构表征分析

2.2.1 PP-XGM 的粒径和 *PDI* 分析 PP、PP-XG 和 PP-XGM 的粒径和 *PDI* 检测结果见表 1. 由表 1 可知,PP-XG 和 PP-XGM 的粒径较 PP 均明显增大. 这是因为 XG 本身的粒径较大,XG 和 PP 以静电作用形成复合物后,该复

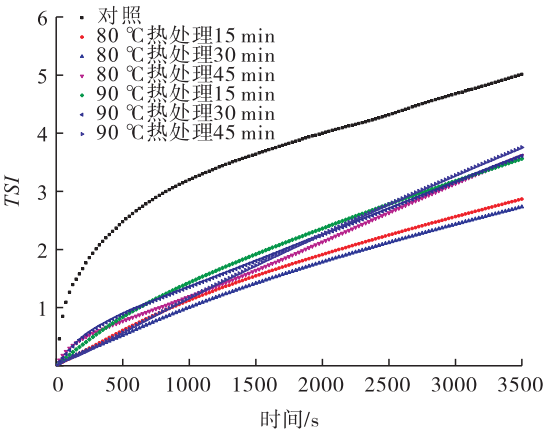


图3 热处理条件对皮克林乳液动力学稳定性的影响

Fig. 3 The effect of heat treatment conditions on the dynamic stability of Pickering emulsion

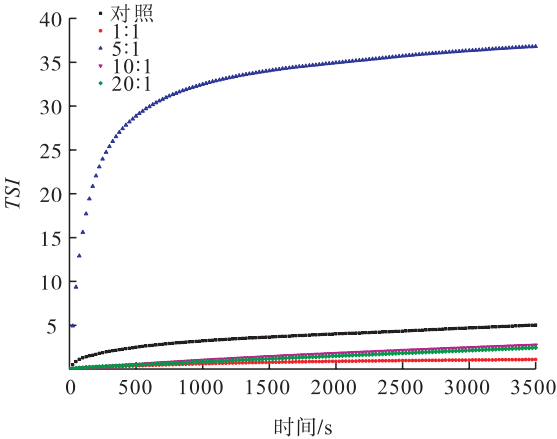


图4 PP/XG 质量比对皮克林乳液动力学稳定性的影响

Fig. 4 The effect of potato protein/xanthan gum mass ratio on the dynamic stability of Pickering emulsion

合物的粒径明显增大. PP-XGM 的粒径 (473.10 nm) 远大于 PP-XG 的粒径 (222.85 nm), 这可能是因为加热导致蛋白质分子结构被破坏, 与多糖结合位点增加, 相互作用增强, 形成了较大的聚集体^[18]. PP-XGM 的 *PDI* 明显小于未处理的 PP-XG, 说明形成微凝胶后, 颗粒分布更均匀.

2.2.2 PP-XGM 的内源性荧光光谱分析 PP-XGM 的内源性荧光光谱和荧光指数 (*FI*) 如图 5 和表 2 所示. 由图 5 和表 2 可知, 与 PP 相比, PP-XG 和 PP-XGM 的最大吸收波长 λ_{\max} 发生了不同程度的蓝移, 这可能是因为热处理时, 原来包埋在 PP 分子内的色氨酸残基被暴露在溶剂中, 而疏水作用又将色氨酸残基重新包埋^[19]. PP-XGM 的 λ_{\max} 向更短波长处移动, 这是由于 PP 与 XG 通过静电、氢键等非共价相互作用引起了蓝移. PP-XGM 的荧光强度 (*FI*) 下降最显著, 这可能是因为 XG 与 PP 之间的静电相互作用导致蛋白质构象改变, 发生荧光猝灭.

2.2.3 PP-XGM 的微观形貌分析 PP-XGM 的微观形貌如图 6 所示. 由图 6 可以看出, PP 为单分散的球形颗粒, 与 XG 静电复合后, PP-XG 为圆球状. 将 PP-XGM 中的单一颗粒放大后发现, 核与壳的密度不同, 说明 PP-XGM 为核壳结构. 有研究表明, 核壳结构内部为蛋白质, 外部较疏松的结构为多糖^[12]. PP 与 XG 通过静电作用形成 PP-XG, 当蛋白质被加热到接近其热变

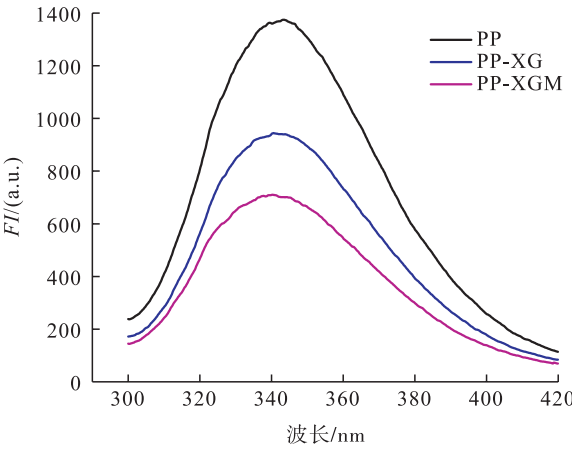


图 5 PP、PP-XG 和 PP-XGM 的内源性荧光光谱
Fig. 5 Endogenous fluorescence spectra of PP、PP-XG and PP-XGM

表 2 PP、PP-XG 和 PP-XGM 的荧光指数
Table 2 Fluorescence index of PP、PP-XG and PP-XGM

样品	λ_{\max}/nm	<i>FI</i> /(a. u.)
PP	343.6	1375.0
PP-XG	340.8	944.4
PP-XGM	340.4	710.4

性温度时, 会从 PP-XG 中分离出来, 并聚集在一起形成蛋白质核, 而蛋白质表面的阳离子与带负电的 XG 相互吸引, 形成具有核壳结构的颗粒. PP-XGM 的尺寸小于通过激光粒度仪测得的粒径. 这可能是因为纳米颗粒中大部分水分在 TEM 的高真空室内蒸发, 导致一些颗粒收缩. 由图 6c) 可知, PP-XGM 与背景对比强烈, 表明 PP 与 XG 交联紧密.

2.3 PP-XGM 的乳化特性分析

油相的体积分数在乳状液乳化过程中起主导作用. PP、PP-XG 和 PP-XGM 对乳液乳化稳定性的影响如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 所有实验组别的 ESI 值均随油相体积分数的增加呈先增大后减小的趋势, 其中, 由 PP 和 PP-XG 稳定的乳液在油相体积分数为 40% 时稳定性最好. 这是因为油相体积分数的增加提高了乳液黏

表 1 PP、PP-XG 和 PP-XGM 的
粒径和 *PDI* 检测结果

Table 1 Test results of particle size and polydispersity index of PP, PP-XG and PP-XGM

样品	粒径/nm	<i>PDI</i>
PP	102.33 ± 0.40 ^c	0.51 ± 0.04 ^b
PP-XG	222.85 ± 1.62 ^b	0.78 ± 0.04 ^a
PP-XGM	473.10 ± 8.62 ^a	0.47 ± 0.08 ^c

注: 同一列中, 不同上标小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$).

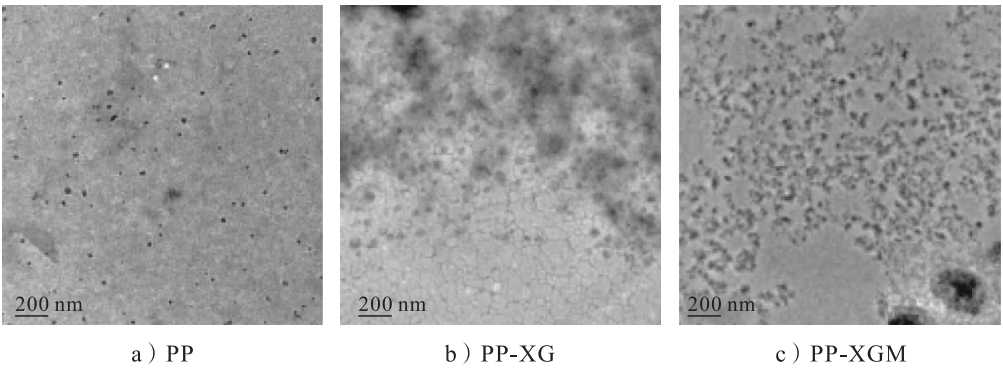


图 6 PP、PP-XG 和 PP-XGM 的微观形貌

Fig. 6 Micro-morphology of PP、PP-XG and PP-XGM

度,降低了乳化速度^[20]. 而随着油相体积分数的进一步增加,颗粒的数量变得不足以完全稳定油滴,乳液的稳定性下降^[21]. 在油相体积分数相同的条件下, PP-XGM 的乳化稳定性高于 PP,这一方面可能是因为 PP-XGM 的电位绝对值越大,微凝胶表面所带电荷越多,颗粒之间的静电斥力越强,可有效抑制颗粒之间的聚集,提高乳液稳定性;另一方面可能是因为由 PP 稳定的乳液中絮凝物以开放的结构存在,而由 PP-XGM 稳定的乳液中,油滴被固定在微凝胶网络结构中,乳液的稳定性增强^[22]. 此外,PP-XGM 吸附到油滴表面可增加水相黏度,抑制液滴的

移动,进而提高乳液的稳定性^[23].

3 结论

本研究对 PP-XGM 的制备条件进行了优化,确定了 PP-XGM 的最佳制备条件为 PP/XG 质量比 1 : 1, pH 值 3. 0, 80 ℃ 热处理 30 min. 结构表征分析发现:静电复合后,PP-XGM 的粒径变大, *PDI* 变小,颗粒分布更均匀;与 PP 相比,PP-XG 和 PP-XGM 的最大吸收波长 λ_{\max} 发生了不同程度的蓝移,且 PP-XGM 的 *FI* 下降最显著; PP-XGM 呈核壳结构. 制备条件优化后的 PP-XGM 可提高乳化体系的稳定性. 该研究可为马铃薯蛋白及多糖资源的开发利用提供一定的技术支持.

参考文献:

[1] DAVID S, LIVNEY Y D. Potato protein based nanovehicles for health promoting hydrophobic bioactives in clear beverages [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 229.

[2] WAGLAY A, KARBOUNE S. Advances in potato chemistry and technology [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2016: 75.

[3] WANG C J, TONG C, ZHANG D L, et al. Preparation and characterization of potato protein-based microcapsules with an emphasis on the

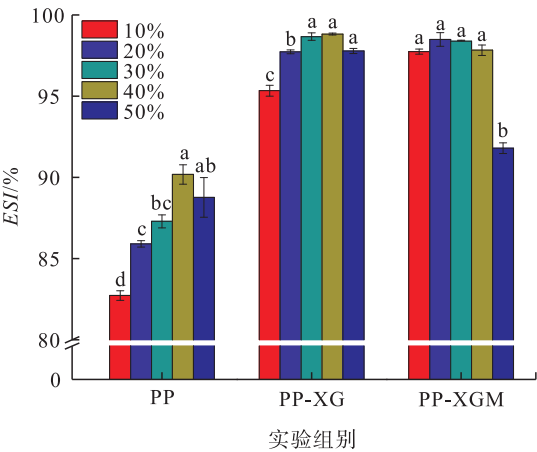


图 7 PP、PP-XG 和 PP-XGM

对乳液乳化稳定性的影响

Fig. 7 The influence of PP, PP-XG and PP-XGM on the emulsification stability of emulsion

- mechanism of interaction among the main components[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100: 2866.
- [4] SCHMIDT J M, DAMGAARD H, GREVE-POULSEN M, et al. Foam and emulsion properties of potato protein isolate and purified fractions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 367.
- [5] MCCLEMENTS D J. Designing biopolymer microgels to encapsulate, protect and deliver bioactive components: Physicochemical aspects [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 240: 31.
- [6] 陈鸿强, 仇丹, 郑红霞, 等. 食品微凝胶的制备、表征与应用[J]. *中国食品添加剂*, 2019 (12): 171.
- [7] YIN B, DENG W, XU K. Stable nano-sized emulsions produced from soy protein and soy polysaccharide complexes[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 380(1): 51.
- [8] TRAN T, ROUSSEAU D. Stabilization of acidic soy protein-based dispersions and emulsions by soy soluble polysaccharides[J]. *Food Hydrocolloids* 2013, 30: 382.
- [9] 樊雪静, 刘红玉, 迟玉杰. 大豆分离蛋白与寡糖静电相互作用及复合物乳化性的分析[J]. 2018, 12(39): 126.
- [10] 夏晓凤. 大豆可溶性多糖对大豆蛋白凝胶的影响及机理初探[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- [11] MAO L K, YANG J, XU D X, et al. Effects of homogenization models and emulsifiers on the physicochemical properties of β -carotene nanoemulsions[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2010, 31(7): 986.
- [12] 丁徐哲. 植物蛋白与大豆多糖纳米凝胶的制备及其应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [13] 孙莹, 魏冬旭, 姚春艳, 等. 不同处理条件对马铃薯糖蛋白 Patatin 构象的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2017(17): 86.
- [14] 刘振艳, 徐红华. 热致乳蛋白微米凝胶的特性[J]. *中国乳品工业*, 2012, 40(11): 7.
- [15] 李兴飞. 大豆乳清蛋白与多糖的复合作用以及蛋白质组分的选择性提[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [16] 甘招娣. 米糠清蛋白-壳聚糖纳米自组装包载姜黄素纳米体系制备与评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [17] JOURDAIN L, LESE M E, SCHMITT C, et al. Stability of emulsions containing sodium caseinate and dextran sulfate: Relationship to complexation in solution [J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(4): 647.
- [18] 袁杨. 食物蛋白与壳聚糖相互作用及其在食品体系的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [19] WANG K Q, LUO S Z, ZHONG X Y, et al. Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 393.
- [20] WANG B, WANG L J, LI D, et al. Effects of protein concentration and oil-phase volume fraction on the stability and rheology of menhaden oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate with xanthan gum [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(1): 165.
- [21] 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(37): 8888.
- [22] 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.
- [23] 冯洁茹, 张鑫浩, 赵春进, 等. 蛋白质-多糖在乳液油-水界面相互作用研究进展[J]. *发酵科技通讯*, 2019, 48(1): 14.