



引用格式:刘兴丽,赵双丽,肖乃勇,等. 马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化特性的影响[J]. 轻工学报,2019,34(5):1-9.

中图分类号:TS201.2 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2019.05.001

文章编号:2096-1553(2019)05-0001-09

# 马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化特性的影响

## Effect of potato protein microgel on emulsifying properties of Pickering emulsion

刘兴丽<sup>1,2</sup>,赵双丽<sup>1,2</sup>,肖乃勇<sup>1,2</sup>,王磊<sup>1</sup>,焦宇晨<sup>1</sup>,张华<sup>1,2</sup>

LIU Xingli<sup>1,2</sup>, ZHAO Shuangli<sup>1,2</sup>, XIAO Naiyong<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, JIAO Yuchen<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1,2</sup>

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;

2. 河南省食品生产与安全协同创新中心,河南 郑州 450001

1. School of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

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

**摘要:**将不同质量分数(2%,4%,6%,8%)的马铃薯蛋白制成微凝胶(PPM2, PPM4, PPM6, PPM8),考察微凝胶的粒径、Zeta-电位、荧光特性、乳化活性、乳化稳定性和微观结构,研究马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化特性的影响。结果表明:随着马铃薯蛋白质量分数的增加,微凝胶颗粒的粒径显著升高(116.31~181.99 nm);PPM2, PPM4, PPM6的Zeta-电位均在30 mV左右,高于对照组;PPM2, PPM4, PPM6的荧光强度高于对照组,而PPM8的荧光强度低于对照组;与对照组相比,微凝胶可显著提高皮克林乳液的乳化活性和乳化稳定性;对照组和所有马铃薯蛋白微凝胶的微观结构表面光滑,对照组的马铃薯蛋白微观结构呈圆球状,而蛋白微凝胶微观结构呈片状聚集,且随着马铃薯蛋白质量分数的增大,聚集单元也越大。

### 关键词:

马铃薯蛋白;微凝胶;  
皮克林乳液;乳化  
特性

### Key words:

potato protein;  
microgel; Pickering  
emulsion; emulsifying  
property

收稿日期:2019-08-31

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 microgel (PPM2, PPM4, PPM6, PPM8) were prepared at different mass fractions (2%, 4%, 6%, 8%). The particle size, Zeta-potential, fluorescence characteristic, emulsifying activity, emulsion stability and microstructure of of microgel were investigated. The effect of potato protein microgel on the emulsification characteristics of Pickering emulsion was studied. The results showed that the particle size of the microgel particles increased significantly (116.31 ~ 181.99 nm) with the increase of protein fraction during microgel preparation. The Zeta-potentials of PPM2, PPM4 and PPM6 were about 30 mV and higher than that of the control group. The fluorescence intensity of PPM2, PPM4 and PPM6 was higher than that of the control group, while the fluorescence intensity of PPM8 was lower than that of the control group. Compared with the control group, the microgel significantly improved the emulsion activity and emulsion stability of the Pickering emulsion. The microstructure results showed that the surface of the control group and all potato protein microgel were smooth, the control group was spherical, the potato protein microgel was aggregated in a sheet form, and the aggregation unit was larger with the increase of the potato protein mass fraction.

## 0 引言

皮克林乳液(Pickering emulsion)是指由固态粒子作为乳化稳定剂的乳液,这些固态粒子能很好地吸附到油水界面上,从而形成稳定的乳状液<sup>[1]</sup>.传统乳液在生产过程中需要添加无机高分子类型的表面活性剂来提高其稳定性,而皮克林乳液中的稳定剂可以用天然生物来源的物质代替,如蛋白质、多糖、脂质等<sup>[2]</sup>.近年来,由于消费者对绿色食品的关注逐渐增多,研究者更倾向于利用生物来源的物质来稳定乳液,以增加食品乳液的安全性,这已成为食品领域的研究热点.

蛋白微凝胶是一种具有三维交联网状结构的胶体颗粒,由高度溶胀的交联聚合物通过共价键或其他作用力聚合而成<sup>[3]</sup>.微凝胶具有两亲性,绝大多数的微凝胶都具有表面活性,能够提高食品乳化体系的稳定性.当聚合物内部的拓扑网络结构与其他吸附颗粒发生相互作用时,微凝胶颗粒会发生重排和变形,在界面形成结实的界面膜,降低油水界面的张力,从而提高乳液稳定性<sup>[4-6]</sup>.但是,微凝胶的乳化特性易受到环境因素的影响,依赖于微凝胶的微观结构<sup>[7]</sup>.N. F. N. Silva 等<sup>[8]</sup>研究发现,使用天然交联剂京尼平可以与酪蛋白交联形成微凝胶,且其具有较好的乳化稳定性.M. Destribats 等<sup>[9]</sup>在

较大 pH 值和离子强度范围内将乳清蛋白微凝胶应用于以甘油三酯为主要油相的油包水乳状液中,发现微凝胶可提高乳状液的稳定性.L. Zimmerer 等<sup>[10]</sup>在 pH 值为 4.8 时,用  $\beta$ -乳球蛋白和高甲氧基果胶混合形成微凝胶,发现凝胶微粒可以增强乳状液的稳定性.C. Schmitt 等<sup>[11]</sup>通过控制热处理条件制备的乳清分离蛋白微凝胶在等电点处原位聚集,能使气泡的歧化反应明显降低,从而有效地提高乳化稳定性.目前,提高乳液稳定性的研究主要集中在动物蛋白微凝胶,而植物蛋白微凝胶的研究则相对较少.

马铃薯属于茄科一年生的草本植物,是全球公认并由联合国确认的人类第四大重要的粮食作物<sup>[12]</sup>,仅次于小麦、稻谷和玉米.研究表明<sup>[13]</sup>,马铃薯容易被人体消化、吸收,且马铃薯的蛋白质具有很高的营养价值,相当于鸡蛋的蛋白质所具有的营养成分.基于此,本文拟研究不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶的颗粒特性、乳化特性和微观结构的影响,阐明由不同质量分数的马铃薯蛋白制备的微凝胶对皮克林乳液的乳化活性、乳化稳定性的影响规律,以期马铃薯蛋白的功能性研究提供理论依据.

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料

马铃薯蛋白粉(蛋白含量 90.01%),兰州

沃特莱斯生物科技有限公司产;  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 天津市大茂化学试剂厂产;  $\text{HCl}$ , 洛阳昊华化学试剂有限公司产; 十二烷基硫酸钠, 天津市风船化学试剂科技有限公司产. 以上试剂均为分析纯.

## 1.2 实验仪器与设备

AL204 分析天平, FE20 Plus pH 测量计, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司产; LGJ-10 真空冷冻干燥机, 河南兄弟仪器设备有限公司产; UV-1100 紫外分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司产; FA25 均质器, 上海弗鲁克科技发展有限公司产; F-7000 荧光分光光度计, 日本日立公司产; TG16-WS 离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产; MS7-H550-Pro 磁力搅拌器, 北京大龙兴创实验仪器有限公司产; DFT-100 粉碎机, 上海麦尚科学仪器有限公司产; Vortex-2 旋涡震荡器, 上海沪析实业有限公司产; DZKW-4 恒温水浴锅, 北京中兴伟业仪器有限公司产; Nano-ZS 激光纳米粒度仪, 美国马尔文公司产; Turbiscan Lab 稳定性分析仪, 法国 Formulaction 公司产; JSM-7100F 场发射扫描电镜, 日本电子公司产.

## 1.3 实验方法

**1.3.1 不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶的制备** 用不同质量分数(2%, 4%, 6%, 8%)的马铃薯蛋白制备微凝胶, 分别标记为 PPM2, PPM4, PPM6, PPM8, 以未处理的马铃薯蛋白作为对照. 将马铃薯蛋白称重后, 用磁力搅拌器搅拌约 4 h, 使蛋白与水充分水合, 用 0.1 mol/L 的  $\text{HCl}$  溶液调节其 pH 值为 7.0, 于 90 °C 条件下加热 30 min 后立即放入冰水浴, 冷却至室温. 将冷却的溶液于 3000 r/min 条件下离心 30 min, 除去不溶性沉淀, 取上清液, 再将上清液于 5000 r/min 条件下离心 30 min, 取上清液冷冻干燥, 即得实验用微凝胶. 于 4 °C 条件下储存备用.

**1.3.2 微凝胶粒径、Zeta-电位的测定** 根据

丁徐哲等<sup>[14]</sup>的方法, 并加以改进来进行测定. 分别将微凝胶和对照组样品分散在 0.1 mol/L, pH = 7 的磷酸盐缓冲溶液中, 配制成质量分数为 0.05% 的溶液. 使用激光纳米粒度仪测定样品溶液的平均表观流体力学粒径和 Zeta-电位, 测试温度 25 °C, 平衡时间 120 s.

**1.3.3 微凝胶荧光光谱的测定** 根据孙莹等<sup>[15]</sup>的方法, 并加以改进来进行测定. 分别将微凝胶和对照组样品分散在 0.1 mol/L, pH = 7 的磷酸盐缓冲溶液中, 配制成质量浓度为 1 mg/mL 的溶液. 使用荧光分光光度计测定样品溶液的荧光光谱, 激发波长为 290 nm, 发射波长的范围为 300 ~ 420 nm, 设置发射和激发波长的狭缝为 2.5 nm.

**1.3.4 皮克林乳液乳化活性的测定** 配制质量浓度为 0.001 g/mL 的蛋白微凝胶溶液, 取 7.5 mL 该溶液, 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.

乳化活性的测定参照崔珊珊等<sup>[16]</sup>的方法, 并加以改进. 皮克林乳液经乳化均质后, 立即从底部吸取 20  $\mu\text{L}$  乳液, 加入到 5 mL 质量分数为 0.1% 的 SDS 溶液中, 漩涡震荡 5 s, 用紫外分光光度计在 500 nm 处测吸光度值  $A_0$ . 均质后的皮克林乳液在室温静置 10 min 后, 从底部吸取 20  $\mu\text{L}$  乳液, 加入到 5 mL 质量分数为 0.1% 的 SDS 溶液中, 用紫外分光光度计在 500 nm 处测吸光度值  $A_{10}$ .

乳化活性的计算公式为

$$\text{乳化活性} = \frac{2 \times 2.203 \times A_0 \times 250}{c \times L \times (1 - \varphi) \times 10\,000}$$

式中,  $A_0$  表示 500 nm 处的吸光度值,  $c$  表示蛋白微凝胶的质量浓度/(g · mL<sup>-1</sup>), 比色皿厚度  $L = 1$  cm,  $\varphi$  表示油相的体积分数.

**1.3.5 皮克林乳液乳化稳定性的测定** 采用与 1.3.4 相同的皮克林乳液制备方法和吸光度

值测定方法,乳化稳定性的计算公式为

$$\text{乳化稳定性} = \frac{A_0}{A_0 - A_{10}} \times 10$$

式中,  $A_0$  和  $A_{10}$  分别表示皮克林乳液静置 0 min 和 10 min 后的吸光度值。

相较于上述传统的皮克林乳液乳化稳定性的测定方法,多重光散射法可以更为直观地观察到皮克林乳液聚集、絮凝、沉降、浮油等失稳现象. 根据许朵霞等<sup>[17]</sup>的方法,利用多重光散射原理,采用稳定性分析仪对皮克林乳液的乳化稳定性进行分析. 红外光源的波长为 880 nm,温度控制在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,在 60 min 内连续扫描样品,获得透射光和背散射光信号对样品高度的函数曲线图. 实验选用稳定性动力学指数 ( $\Delta BS$  值和  $TSI$  值) 作为评价皮克林乳液乳化稳定性的指标. 其中,  $\Delta BS$  表示背散射光相对值,  $\Delta BS$  绝对值越小,表明皮克林乳液的乳化稳定性越好;而多重不稳定现象对光强度变化的综合作用可以用  $TSI$  来表征,  $TSI$  越大,表明皮克林乳液越不稳定。

**1.3.6 蛋白微凝胶微观结构的测定** 采用场发射扫描电镜观察蛋白微凝胶的微观结构. 将干燥后的待测样品均匀分散于贴有导电双面胶的样品台上,在离子溅射镀膜仪中镀金处理后,观察样品颗粒形貌,工作电压为 10 kV,放大倍数为 2000.

## 1.4 数据处理与分析

所有实验均重复 3 次,取平均值,数据记录为(平均值  $\pm$  标准偏差). 采用 SPSS 24.0 和 Excel 2007 软件进行数据分析和作图. 单因素方差分析中,  $P < 0.05$  即为差异显著,  $P > 0.05$  为差异不显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒粒径的影响

表 1 为不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶

颗粒的粒径分布和分散系数结果. 由表 1 可知,与对照组相比,不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶的颗粒粒径(116.31 ~ 181.99 nm)均小于对照组的颗粒粒径(298.30 nm),且随着质量分数的增大,微凝胶的颗粒粒径有增大的趋势. 这可能是因为随着马铃薯蛋白质量分数的增大,蛋白质分子间的空间距离降低,颗粒间的相互作用增加,然而,最终微凝胶颗粒的大小还取决于蛋白质分子之间斥力与吸引力的平衡<sup>[18]</sup>.

分散系数表示聚合物的分散性,数值越小表明粒径的分布越均匀. 由表 1 可知,由不同质量分数的马铃薯蛋白制备的微凝胶颗粒,分散系数变化较为不显著;对照组和质量分数为 6% 的马铃薯蛋白制备的微凝胶 PPM6 分散系数较大,均达到了 0.46;而由质量分数为 2% 的马铃薯蛋白制备的微凝胶 PPM2 分散系数较低,为 0.33,表明由质量分数为 2% 的马铃薯蛋白制备的微凝胶样品的粒径分布较为均一。

### 2.2 不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒 Zeta - 电位的影响

图 1 为不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒电位的影响. 用 Zeta - 电位来表征蛋白质分子表面的电荷, Zeta - 电位的绝对值大于 30 mV,有利于微凝胶颗粒的稳定悬浮<sup>[18]</sup>. 与对照组的 Zeta - 电位相比, PPM2, PPM4, PPM6 的

表 1 不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶颗粒的粒径分布和分散系数结果

Table 1 Particle size distribution and dispersion coefficient results of potato protein microgel particles with different mass fractions

样品	粒径/nm	分散系数
对照组	298.30 $\pm$ 10.98 <sup>a</sup>	0.46 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>
PPM2	116.31 $\pm$ 0.42 <sup>d</sup>	0.33 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>
PPM4	136.43 $\pm$ 6.15 <sup>e</sup>	0.41 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>
PPM6	129.22 $\pm$ 0.69 <sup>e</sup>	0.46 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>
PPM8	181.99 $\pm$ 5.49 <sup>b</sup>	0.42 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>

注:肩标字母相同表示数值之间不具有显著性差异 ( $P > 0.05$ );肩标字母不同表示数值之间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )

Zeta - 电位均在 30 mV 左右,高于未处理的马铃薯蛋白. 经过热处理的蛋白质的二级或三级结构易于发生转变,导致更多带电的氨基酸暴露在分子表面,引起 Zeta - 电位的变化. 较高的表面电荷引起较强的静电排斥,将有助于提高蛋白质微凝胶在悬浮液中的稳定性. 而 PPM8 的 Zeta - 电位较低,这与常翠华<sup>[19]</sup>的研究结果一致. 这可能是因为随着马铃薯蛋白质量分数的增大,蛋白质聚集程度增加,粒子表面带电荷肽段发生结构重排,从而影响颗粒最终的内部、界面结构.

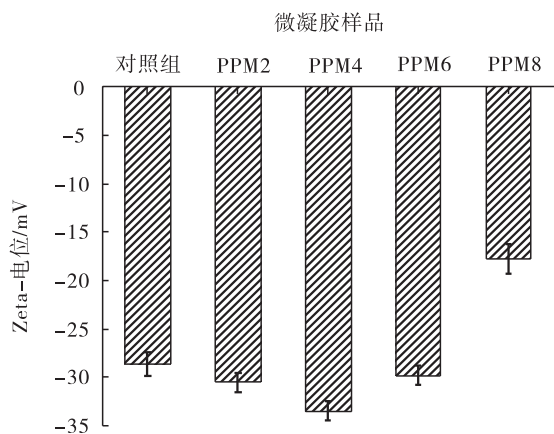


图1 不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒 Zeta - 电位的影响

Fig. 1 The effect of potato protein with different mass fractions on the Zeta-potential of microgel particle

### 2.3 不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒荧光特性的影响

蛋白质分子中的酪氨酸、色氨酸和苯丙氨酸可以发出荧光,蛋白质中氨基酸的荧光通常在 290 nm 或更长的波长上被激发. 图 2 为不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒荧光特性的影响. 与对照组相比,PPM2, PPM4, PPM6 的荧光强度显著高于对照组马铃薯蛋白. 这可能是因为加热导致了马铃薯蛋白结构逐渐展开,酪氨酸、色氨酸和苯丙氨酸残基暴露在溶剂中,使得荧光强度增加,这与马爽<sup>[20]</sup>的研究结果一致. PPM8 的荧光强度有降低的趋势,这可能是

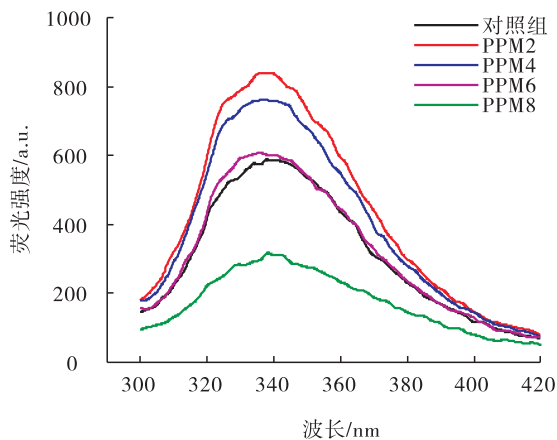


图2 不同质量分数的马铃薯蛋白对微凝胶颗粒荧光特性的影响

Fig. 2 The effects of potato protein with different mass fractions on the fluorescence characteristics of microgel particles

由于在加热制备微凝胶的过程中,加热导致蛋白聚集,具有荧光特性的氨基酸被隐藏起来,从而使得微凝胶荧光强度降低.

### 2.4 不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化活性的影响

不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化活性的影响情况如图 3 所示. 与对照组相比,马铃薯蛋白微凝胶(尤其是 PPM6)能够使皮克林乳液乳化活性显著增加( $P < 0.05$ ). PPM8 的乳化活性略有降低,但影响并不显著( $P > 0.05$ ). 这可能是因为由低质量分数的马铃薯蛋白制备的微凝胶能够使蛋白质部分展开,分子的柔顺性增加,利于皮克林乳液乳化活性的改善. 然而,由高质量分数的马铃薯蛋白制备的微凝胶会出现蛋白质的聚集,使微凝胶的粒径增加,降低皮克林乳液的乳化活性,也可能是因为热处理影响蛋白质的表面疏水性,进而影响其乳化性能<sup>[21]</sup>.

### 2.5 不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化稳定性的影响

不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶对皮克

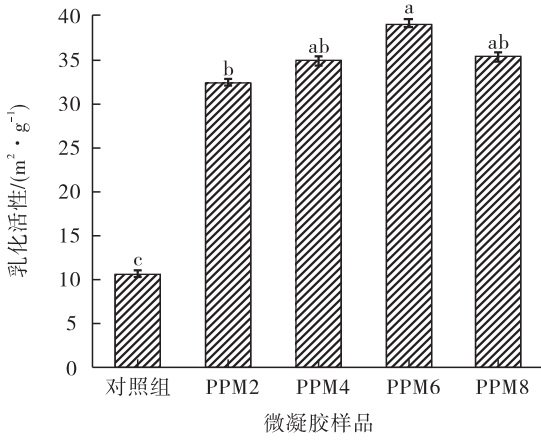


图3 不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化活性的影响

Fig. 3 The effect of potato protein microgel with different mass fractions on the emulsification activity of Pickering emulsion

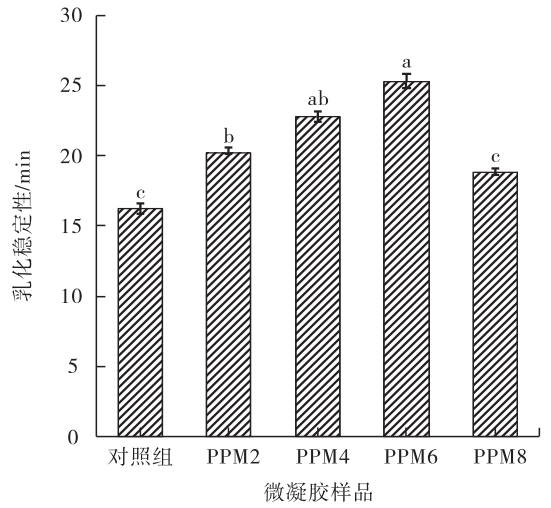


图4 不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化稳定性的影响

Fig. 4 The effect of potato protein microgel with different mass fractions on the emulsification stability of Pickering emulsion

林乳液乳化稳定性的影响如图4所示. 由图4可知,皮克林乳液的乳化稳定性与乳化活性的趋势基本一致. 与对照组相比,微凝胶颗粒可显著提高皮克林乳液的乳化稳定性,皮克林乳液的乳化稳定性结果为 PPM6 > PPM4 > PPM8 > PPM2 > 对照组. 这可能是因为马铃薯蛋白经过

加热之后内部复杂结构舒展开,疏水性氨基酸暴露在分子外面,增加了分散相接触的面积,更有利于样品在油水界面的吸附,增强乳液的稳定性,这与潘成磊等<sup>[22]</sup>的研究结果一致.

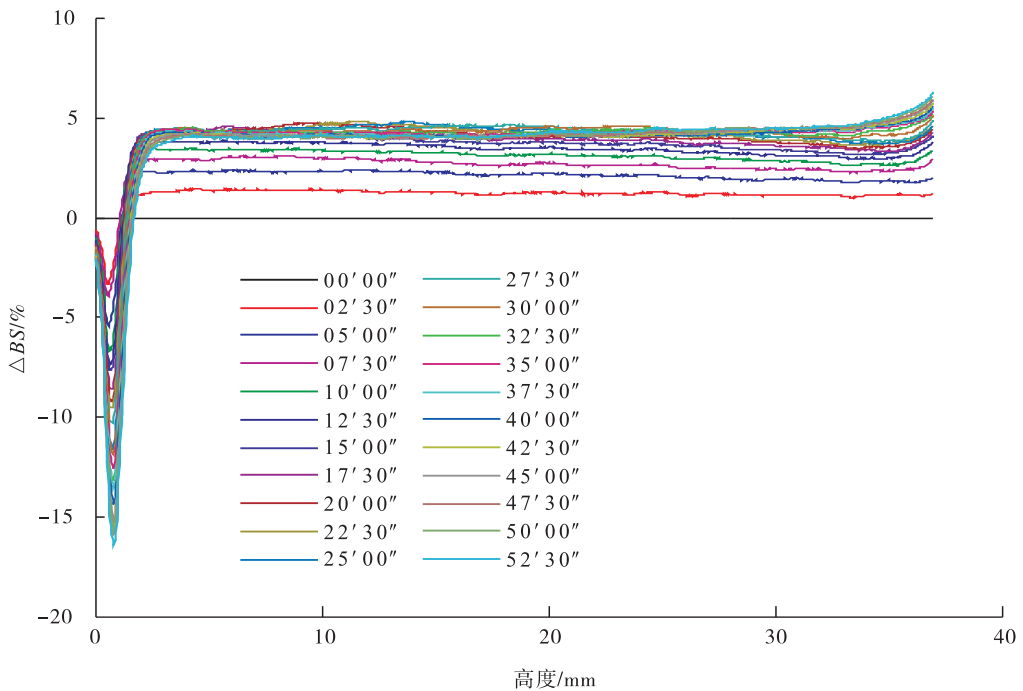


图5 马铃薯蛋白微凝胶对ΔBS值的影响

Fig. 5 The effect of potato protein microgel on ΔBS value



采用多重光散射法研究马铃薯蛋白微凝胶对  $\Delta BS$  值和  $TSI$  值的影响,结果分别如图 5 和图 6 所示. 由图 5 可知,马铃薯蛋白、马铃薯蛋白微凝胶样品制备的皮克林乳液样品顶部和底部均发生变化,底部的  $\Delta BS$  值降低,表明底部出现澄清层;顶部和中部的  $\Delta BS$  增加,表明顶部和中部出现乳析层,粒子有向上迁移的趋势. 这表明本实验制备的皮克林乳液有上浮的现象. 这可能是因为皮克林乳液是不稳定体系,随着贮藏时间的延长会出现絮凝、聚集、沉淀、上浮等现象.

由图 6 可知,在开始 1000 s 左右时,皮克林乳液的  $TSI$  值变化较大,之后趋于稳定,这与传统方法测定的乳液在 20 min 左右趋于稳定的结果一致. 皮克林乳液的乳化稳定性结果为  $PPM2 \approx PPM4 > PPM8 > PPM6 >$  对照组,该结果与前文通过传统方法得到的皮克林乳液的乳化稳定性结果不相同,但与 K. L. Wang 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致. 这可能是因为利用传统方法测试皮克林乳液的乳化稳定性时,用肉眼观察并记录下来的只是起沫造成的乳化液滴的上升,

但絮凝和凝聚也是影响皮克林乳液乳化稳定性的因素之一. 而利用多重光散射法记录和计算的不仅是乳化,还有絮凝和聚结. 因此,传统方法得出的结果可能与多重光散射法的评价结果不同,皮克林乳液的乳化稳定性评价方法还需要根据项目的实际需要进行选择.

## 2.6 马铃薯蛋白微凝胶的微观结构分析结果

不同质量分数的马铃薯蛋白微凝胶的微观结构见图 7. 从图 7 可以看出,对照组的马铃薯

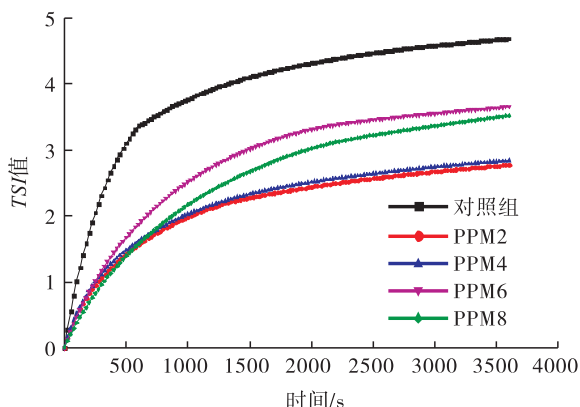


图 6 马铃薯蛋白微凝胶对  $TSI$  值的影响

Fig. 6 The effect of potato protein microgel on  $TSI$  value

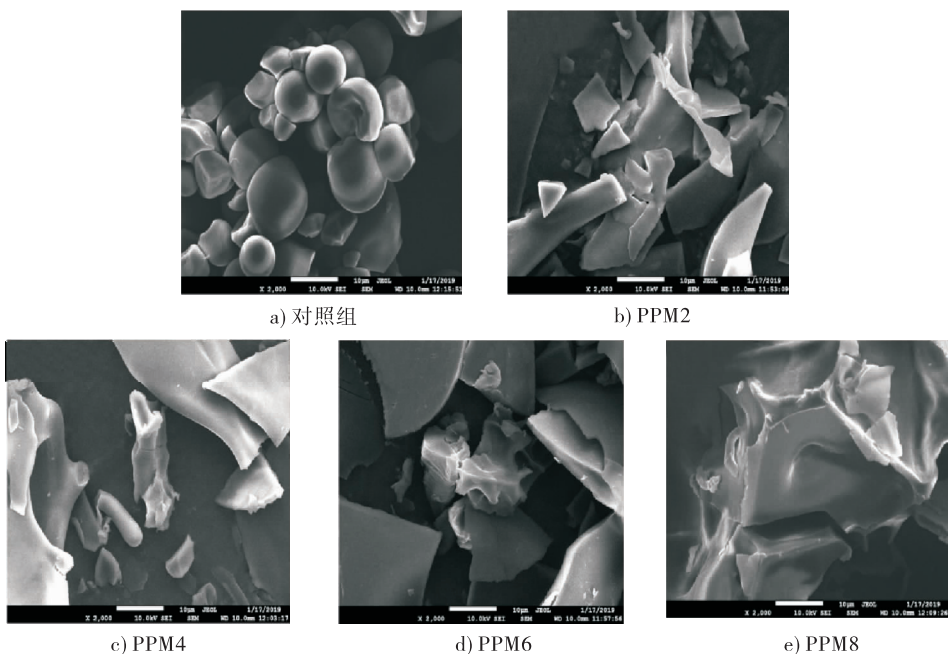


图 7 不同质量分数马铃薯蛋白微凝胶的 SEM 图

Fig. 7 The SEM image of potato protein microgel with different mass fractions

蛋白呈圆球状,而蛋白微凝胶呈片状聚集.对照组和所有蛋白微凝胶的表面光滑,由连接良好的蛋白质分子组成.这与常翠华<sup>[19]</sup>的研究结果相近,在远离等电点时形成表面光滑的蛋白微凝胶.随着马铃薯蛋白质量分数的增大,逐渐形成大的聚集单元,尤其是当马铃薯蛋白质量分数为8%时.这可能是因为随着马铃薯蛋白质量分数的增大,蛋白质分子相互作用力增强,从而形成大分子的聚集.

### 3 结论

本文将不同质量分数的马铃薯蛋白制备成微凝胶,分别考察微凝胶的粒径、Zeta - 电位、荧光特性、乳化活性、乳化稳定性和微观结构,研究马铃薯蛋白微凝胶对皮克林乳液乳化特性的影响.结果表明:随着马铃薯蛋白质量分数的增大,微凝胶颗粒的粒径显著升高(116.31 ~ 181.99 nm);PPM2,PPM4,PPM6的Zeta - 电位均在30 mV左右,高于对照组;PPM2,PPM4,PPM6的荧光强度高于对照组,而PPM8的荧光强度低于对照组;与对照组相比,微凝胶可显著提高皮克林乳液的乳化活性和乳化稳定性,利用传统方法测定的皮克林乳液的乳化稳定性结果为PPM6 > PPM4 > PPM8 > PPM2 > 对照组,而利用多重光散射法测得皮克林乳液的乳化稳定性结果为PPM2 ≈ PPM4 > PPM8 > PPM6 > 对照组;对照组和所有蛋白微凝胶的微观结构表面光滑,对照组的马铃薯蛋白微观结构呈圆球状,而蛋白微凝胶微观结构呈片状聚集,且随着马铃薯蛋白的质量分数的增大,聚集单元也越大.本文为研究蛋白微凝胶对皮克林乳液的影响机制提供了一定的理论依据.

### 参考文献:

- [1] 张亚珍,熊文飞,裴亚琼,等.盐离子对花生粕分离蛋白纳米粒子及其稳定皮克林乳液特性的影响[J/OL].食品科学:(2018-09-10)[2018-12-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20181214.1348.008.html>.
- [2] 朱雨晴,刘伟,陈兴,等.食品级皮克林乳液的稳定机制及稳定性研究进展[J].食品工业科技,2018,39(7):315.
- [3] 姜帅,李媛媛,赵畅,等.微凝胶在食品中的应用及研究进展[J].食品工业科技,2016,37(22):365.
- [4] MÜLLER C B, RICHTER W. Sealed and temperature-controlled sample cell for inverted and confocal microscopes and fluorescence correlation spectroscopy [J]. Colloid & Polymer Science, 2008, 286(11):1215.
- [5] QUP, BOUCHOUX A, GÉSAN-GUIZIOU G. On the cohesive properties of casein micelles in dense systems[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43(28):753.
- [6] NICOLAI T. Formation and functionality of self-assembled whey protein microgels [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016, 137:32.
- [7] SEMENOVA M. Protein-polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles [J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2017, 28(2):15.
- [8] SILVA N F N, SAINT-JALMES A, DE CARVALHO AF, et al. Development of casein microgels from cross-linking of casein micelles by genipin [J]. Langmuir, 2014, 30(34):10167.
- [9] DESTRI BATS M, ROUVET M, GEHIN-DELVAL C, et al. Emulsions stabilised by whey protein microgel particles: Towards food-grade Pickering emulsions [J]. Soft Matter, 2014, 10(36):6941.
- [10] ZIMMERER L, JONES O G. Emulsification capacity of microgels assembled from  $\beta$ -Lactoglobulin and pectin [J]. Food Biophysics, 2014,



- 9(3):229.
- [11] SCHMITT C, BOVAY C, ROUVET M. Bulk self-aggregation drives foam stabilization properties of whey protein microgels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 42(6):139.
- [12] 康亚武. 马铃薯 22-kD 球蛋白的分离纯化及其结构测定的研究 [D]. 长春:吉林农业大学, 2011.
- [13] 马莺. 马铃薯加工业的现状与发展前景 [J]. *中国马铃薯*, 2001, 15(2):123.
- [14] 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.
- [15] 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, 38(17):80.
- [16] 崔珊珊, 木泰华, 孙红男, 等. 超高压下酶解处理对甘薯蛋白乳化特性的影响 [J]. *核农学报*, 2016, 30(6):1117.
- [17] 许朵霞, 包亚妮, 闫冰, 等. 乳清分离蛋白与壳聚糖美拉德反应初级阶段产物乳化性研究 [J]. *食品科学*, 2012, 33(7):16.
- [18] 谢晶晶. 大豆分离蛋白与甜菜果胶的静电复合研究及应用 [D]. 武汉:湖北工业大学, 2013.
- [19] 常翠华. 蛋清蛋白界面吸附、聚集行为及应用特性研究 [D]. 无锡:江南大学, 2018.
- [20] 马爽. 高强度超声对乳清蛋白的结构及功能特性的影响研究 [D]. 长春:吉林大学, 2018.
- [21] CHANDRAPALA J, ZISU B, KENTISH S, et al. The effects of high-intensity ultrasound on the structural and functional properties of  $\alpha$ -Lactalbumin,  $\beta$ -Lactoglobulin and their mixtures [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2):940.
- [22] 潘成磊, 丁景, 董唯, 等. 热处理温度对猪肝水溶性蛋白乳化性质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2019, 6(2):1.
- [23] WANG K L, LI G, ZHANG B. Opposite results of emulsion stability evaluated by the TSI and the phase separation proportion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 56(34):235.