

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.035

磷脂-大豆分离蛋白复合物溶液理化与流变特性*

李菊芳¹ 吕莹² 徐婧婷¹ 左锋¹ 郭顺堂¹

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 北京农学院食品科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: 为明确大豆磷脂对大豆分离蛋白溶液特性和流体特性的影响, 考察了磷脂-大豆分离蛋白复合物表面电荷、粒径、流体类型及溶液粘度的变化。实验结果表明: 随着磷脂复合量的增加蛋白颗粒表面负电荷增强, 颗粒粒径不断增大, 可溶性蛋白质含量提高。流变特性分析发现: 随磷脂复合量的增加, 流体特性指数 n 开始小于 1 时所对应的大豆蛋白质量分数逐渐减小, 表明磷脂的复合使得蛋白流体类型变化的质量分数拐点降低, 且适量磷脂的复合可以降低蛋白溶液粘度。

关键词: 大豆分离蛋白 磷脂 Zeta 电位 粒径 流体类型 粘度

中图分类号: TS102.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0207-06

Solution Physicochemical Properties and Rheological Behavior of Lecithin – Soybean Protein Complex

Li Jufang¹ Lü Ying² Xu Jingting¹ Zuo Feng¹ Guo Shuntang¹

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Food Science and Engineering College, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to confirm the soybean protein solution properties and rheological behavior after combined with lecithin, the surface charge, particle size, fluid type and the solution viscosity of lecithin-soybean protein complex were investigated. The results showed that the enhanced negative charge of protein particle, greater particle size and improvement of soluble protein were occurred with the increasing of combined lecithin content. The rheological characterization data displayed that the corresponding protein concentration reduced gradually when the n value, which indicated the fluid type, began to less than 1 with the increasing of lecithin combined content. This change explained that the complex of lecithin on soybean protein could lower the inflection point of protein concentration which indicated the change of fluid type. And then the protein viscosity was reduced by the effect of moderate lecithin content.

Key words: Soybean protein Lecithin Zeta potential Particle size Fluid type Viscosity

引言

大豆分离蛋白(SPI)由于具有高营养、良好的溶解性和乳化性等功能特性而被广泛地应用于食品工业,但是天然大豆蛋白功能性不兼容,很难满足食品加工的需求,需对其进行适度的改性^[1]。磷脂作

为一种高营养的天然乳化剂可以改变蛋白表面活性、修饰蛋白结构和表面电荷,或者将蛋白结合到磷脂分子形成的胶束或者囊泡中去^[2-3]。磷脂中的磷脂酰胆碱(PC)以分子或多个PC分子形成的片层结构与大豆分离蛋白表面疏水区域结合,形成多种形式的蛋白-磷脂二元复合物,但7S与PC囊泡的结

收稿日期: 2013-02-28 修回日期: 2013-03-05

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD34B03)

作者简介: 李菊芳, 博士生, 主要从事大豆蛋白研究, E-mail: nmglj109@163.com

通讯作者: 郭顺堂, 教授, 博士生导师, 主要从事蛋白质加工利用研究, E-mail: shuntang@cau.edu.cn

合程度比 11S 大^[4~8]。溶液环境因素对磷脂-蛋白复合物的稳定性也产生重要影响,如离子强度、pH 值等^[9~11]。疏水磷脂可以保护牛奶蛋白,克服乳清蛋白和酪蛋白胶束加热后形成的热聚集现象,而大豆磷脂通过与乳白蛋白发生疏水相互作用改变蛋白构象、增加乳状液的负 Zeta 电位,通过抑制巯基氧化或降低游离巯基之间的反应几率来提高乳状液的热稳定性^[12~13]。

磷脂-蛋白复合物的形成改变了蛋白质的乳化性及水包油乳浊液稳定性,从而也会影响蛋白质理化性质及在水溶液中的流变行为。因此,本文从食品加工的角度出发,选取组分未分离的大豆磷脂与大豆蛋白复合,比较复合磷脂前、后大豆分离蛋白胶体颗粒的 Zeta 电位、粒径分布、粘度及流体类型的变化,对复合磷脂前、后 SPI 溶液的理化性质及流变特性进行分析,进而为磷脂改善大豆分离蛋白功能特性的应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

低温脱脂豆粕(蛋白质质量分数不小于 51%),秦皇岛金海粮油工业有限责任公司;大豆磷脂(丙酮不溶物质量分数不小于 95%,乙醚不溶物质量分数不大于 0.1%,水分含量不大于 5%),北京蓝弋生物科技有限公司;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、盐酸、氢氧化钠等化学试剂均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器设备

M3-PALS 技术 Zetasizer Nano ZS90 型纳米粒径电位分析仪(英国马尔文仪器有限公司);UV-1800 型紫外可见分光光度仪(日本岛津公司);LSTM230 型粒度分布仪(美国贝克曼-库尔特公司);R/S Plus 型流变仪(美国 Brookfield)

1.3 SPI 及磷脂-大豆蛋白(Lec-SPI)复合物制备

大豆分离蛋白的制备根据 Sorgentini 等的方法,略作改动^[14]。将脱脂豆粕与水以质量比 1:10 的比例混合,调节 pH 值至 8.0(2 mol/L NaOH),室温下抽提 2 h,4 000 r/min 离心 20 min,弃去沉淀。调节上清液的 pH 值至 4.5(2 mol/L HCl),静置 30 min 后,1 000 r/min 离心 5 min,弃去上清,水洗沉淀 2 次(1 000 r/min 离心 5 min)后再复溶,调节 pH 值至 8.0(2 mol/L NaOH),喷雾干燥备用。大豆蛋白质量分数为(89.7±0.3)%。

Lec-SPI 复合物的制备:大豆分离蛋白及大豆磷脂(Lec)溶于 pH 值 7.2 的磷酸缓冲液中,分别于室温及 55℃ 水浴中搅拌 60 min 至充分溶解。然后

SPI 与 Lec 按一定的质量比量取两种溶液,再于室温下搅拌 60 min 使磷脂与大豆分离蛋白充分复合,所得样品用于下一步分析。

1.4 分析方法

1.4.1 复合磷脂 SPI 的 Sephacryl S-1000 凝胶层析

参考 Hirotsuka 等的方法,略作改动^[9]。选取大豆蛋白及 Lec 与 SPI 质量比为 0.4 的复合物(pH 值为 7.2)制成蛋白质量分数为 2% 的溶液,15 000 r/min 离心 10 min,除去不溶性杂质。取离心后上清液用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后作为样品上样,上样量为 1 mL。采用 Sephacryl S-1000 凝胶柱(1.6 cm×75 cm),其分离范围为 $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^8$ (以 Dextran 为标准物)。上样后用 30 mmol/L Tris-HCl 缓冲液(pH 值 8.0,含质量分数为 0.02% Na₂S₂O₃,0.15 mol/L NaCl)在室温下洗脱,流速 1.0 mL/min。洗脱液用紫外检测仪在波长 280 nm 下检测,绘制洗脱曲线。

1.4.2 Zeta 电位测定

大豆分离蛋白复合磷脂前、后的 Zeta 电位用纳米粒径电位分析仪测得。固定蛋白质量分数为 1%,选取 3 个不同 pH 值(2、4、8)条件制备复合物,Lec-SPI 复合质量比从 0.001 增加到 1,所得样品溶液通过注射器注入样品池,每个样品测定重复 3 次。

1.4.3 可溶性蛋白质含量测定

质量分数为 1% 大豆蛋白溶液,pH 值为 7.2,复合不同质量比磷脂(0.002、0.01、0.1、1)后于 1 500 r/min 离心 10 min 分离不溶性蛋白及可溶性蛋白。离心后上清液中可溶性蛋白质量浓度(mg/mL)的测定采用考马斯亮蓝法。

1.4.4 粒径分布分析

样品粒径分布分析样品台采用湿法小样品台,粒径测量范围为 0.04~2 000 μm。在 pH 值为 7.2 的溶液中以质量比 0.01、0.1、1 的比例复合磷脂,制成磷脂蛋白复合物后把样品加入样品台,当模糊度稳定在 40%~50% 时开始测定。以水为溶剂,折射率为 1.333,蛋白粒子折射率采用 1.570。采用 Beckman Coulter LS Version 3.29 分析软件计算不同粒径蛋白粒子的体积百分比。

1.4.5 流变特性测定

在 pH 值为 7.2 条件下,分别测定不同蛋白质量分数(1%~8%)下,复合不同质量比磷脂(0.01、0.1、1)前、后样品流体类型及平均表观粘度。采用 R/S Plus 型流变仪(扭矩 0.05~50 mN·m,扭矩分辨率 0.01 mN·m)进行测定。本实验采用同轴圆柱体系测试系统(CC)中 DG 转子(粘度范围 1~

$1.9 \times 10^4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 剪切率 $0 \sim 5039 \text{ s}^{-1}$), 样品的动态流动过程(室温条件)采用变剪切率测定法(体系剪切率范围为 $0 \sim 5000 \text{ s}^{-1}$, 测定时间 300 s , 每隔 2 s 记录 1 次粘度, 共记录 150 个点)。

2 结果与分析

2.1 复合磷脂后大豆蛋白分子量变化

大豆蛋白复合磷脂前、后的样品通过 Sephacryl S-1000 凝胶层析柱进行分析, 结果如图 1 所示。复合磷脂前大豆分离蛋白样品产生 2 个洗脱峰, 在 260 min 处出现 1 个大峰和在 420 min 处产生一个非常小的峰。复合磷脂后, 除在 260 min 和 420 min 处有同样的峰外, 在 100 min 处又出现了一个大峰, 这表明复合磷脂后 SPI 的分子量增大。Nakamura 等利用凝胶层析的方法研究发现蛋黄磷脂与卵白蛋白结合形成磷脂-蛋白复合物, 使得蛋白的乳化活性提高^[15]。

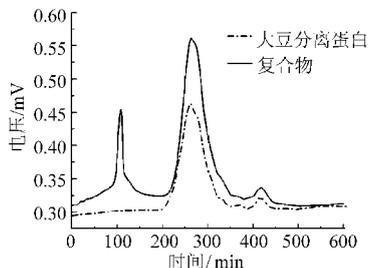


图 1 复合大豆磷脂前、后大豆分离蛋白的凝胶层析
Fig. 1 Size exclusion chromatography of SPI before and after combined with lecithin

2.2 不同 pH 值下复合磷脂大豆蛋白 Zeta 电位与磷脂复合量关系

对复合磷脂前、后 Zeta 电位进行分析, 实验结果如表 1 所示。当蛋白粒子 pH 值为 2 时, 蛋白粒子 Zeta 电位为 30 mV , 具有正电性, 增加磷脂的比例并未改变带电性, 然而复合质量比达到 1 时, 粒子表面上的电位由原来的 30 mV 降到 15 mV 左右。当溶液 pH 值为 4 时, 随着磷脂复合量的增加, Zeta 电位下降十分缓慢, 质量比为 0.02 时产生拐点, 随着磷脂复合量的进一步增大, Zeta 电位呈急剧下降趋势, 复合质量比达到 1 时, Zeta 电位可达 -33 mV 左右。当蛋白粒子 pH 值为 8 时, 蛋白粒子表面带负电, 复合少量带负电的磷脂, 表面电荷无明显变化, 但是当复合磷脂质量比达到 0.02 时, 蛋白粒子表面电荷随着复合量的继续增加开始迅速下降(从 -35 mV 降为 -55 mV), 这与 Chen 等的报道一致^[16]。由此可知, 磷脂可改变蛋白质的电位, 但需要的量(比例)因所处的环境而不同。

表 1 不同 pH 值下 SPI 颗粒表面 Zeta 电位变化

Tab. 1 Change of Zeta potential of SPI particle surface with increase of lecithin content in different pH value

磷脂与大豆 蛋白质量比	Zeta 电位/mV		
	pH 值为 2	pH 值为 4	pH 值为 8
0	30.37 ± 0.15	8.61 ± 0.66	-36.17 ± 0.91
0.001	30.20 ± 0.70	8.38 ± 0.51	-34.00 ± 0.93
0.002	30.13 ± 0.71	8.26 ± 1.22	-35.63 ± 0.15
0.003	29.03 ± 1.00	7.4 ± 0.82	-34.57 ± 1.36
0.01	30.43 ± 0.68	6.25 ± 0.87	-35.77 ± 0.59
0.02	29.47 ± 1.04	4.72 ± 0.99	-34.50 ± 1.51
0.1	27.01 ± 0.85	-3.90 ± 0.34	-40.67 ± 1.02
0.2	28.76 ± 0.38	-15.84 ± 0.39	-44.86 ± 0.83
1	15.66 ± 0.64	-33.55 ± 0.98	-55.67 ± 1.04

2.3 不同磷脂复合量下大豆分离蛋白可溶性与 pH 值关系

复合磷脂 SPI 在不同 pH 值下的可溶性变化如图 2 所示, SPI 随着 pH 值的不断升高可溶性呈现“U”型变化趋势, 在 pH 值为 4.5 左右达到最低。适量大豆磷脂的复合不会改变 SPI 随 pH 值变化的趋势, 但是在其他 pH 值下可溶性蛋白质含量均比未复合磷脂的 SPI 溶液略有提高, 这与不同 pH 值下 Zeta 电位变化趋势一致。

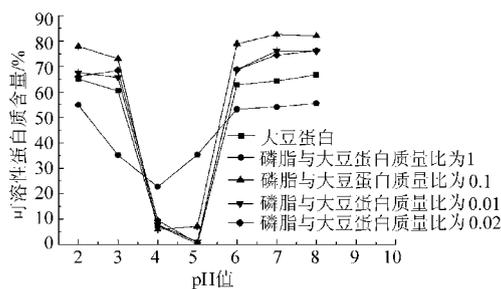


图 2 复合磷脂前、后大豆分离蛋白可溶性蛋白质含量随 pH 值变化曲线

Fig. 2 Change of soluble protein content before and after combined with lecithin

当磷脂与大豆蛋白质量比为 1 时, 可溶性蛋白质含量随 pH 值变化的趋势由“U”型变为“V”型, 这是由于此复合条件下, pH 值为 4 和 5 时可溶性蛋白质含量比未复合磷脂及以其他比例复合磷脂的 SPI 样品有显著性差异(表 2)。

2.4 复合磷脂前、后大豆分离蛋白粒子粒径变化

粒径是胶体粒子稳定性的重要指标, 图 3 为不同磷脂复合量下, SPI 水溶液中胶体颗粒粒径的变化(用体积平均粒径表示)。未复合磷脂的 SPI(对照)粒径主要分布在 $1 \sim 80 \text{ nm}$ 之间, 在 $0.08 \sim 0.8 \text{ nm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ nm}$ 之间也有少量分布, 其中主要分布区又包括两个峰, 峰值大约在 10 nm 和 50 nm 处。磷脂与大豆蛋白质量比为 0.01 时蛋白颗粒粒径有

表2 pH值为4和5时不同磷脂复合量样品可溶性蛋白质含量差异显著性分析

Tab.2 Significance difference analysis of soluble protein content at pH value of 4 and 5

磷脂与大豆蛋白 质量比	可溶性蛋白质含量/%	
	pH值为4	pH值为5
0	7.504 0 ^b	0.214 4 ^a
0.002	9.490 0 ^d	0.582 6 ^b
0.01	7.814 7 ^c	1.077 2 ^c
0.1	5.934 0 ^a	7.185 7 ^d
1	22.664 8 ^c	35.325 0 ^c

注:采用Duncan's multiple range test方法分析,同一列不同字母表示显著性差异($P < 0.05, n = 3$)。

了一定的增大,产生了一部分粒径大于100 nm的大颗粒蛋白。而当二者复合质量比为0.1时部分小粒径粒子减少而大粒子化。二者复合质量比为1时,大粒径颗粒继续增多,粒径分布范围集中在10~80 nm范围内。可见磷脂的复合使蛋白粒子粒径增大,且粒径变大部分主要是10 nm前后的粒子,最终粒径增大到80~100 nm范围内。

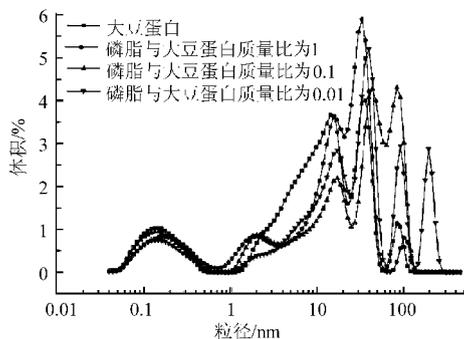


图3 SPI复合磷脂蛋白的粒径变化

Fig.3 Change of SPI particle size in process of combining with lecithin

2.5 复合磷脂SPI的流变学行为变化

蛋白质溶液流变特性受多种因素的影响,如蛋白分子量大小和分布、蛋白结构和形状、蛋白与水以及蛋白与蛋白之间相互作用等^[17-18]。图4为不同SPI质量分数下复合磷脂后溶液的剪切应力与剪切速率的关系曲线。由图4a可知,随着蛋白质量分数

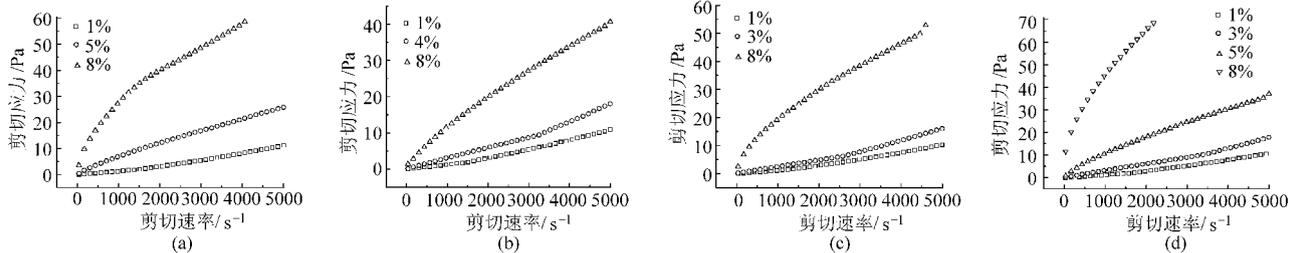


图4 SPI溶液及复合不同量磷脂后溶液流变特性变化

Fig.4 Rheological behavior of SPI solution before and after combining with lecithin

(a) 大豆蛋白 (b) 磷脂与大豆蛋白质量比为0.01 (c) 磷脂与大豆蛋白质量比为0.1 (d) 磷脂与大豆蛋白质量比为1

的增加,SPI溶液的流体类型由弱剪切稠化流体转变为近牛顿流体,再转化为剪切稀化流体。图4b~4d为复合不同量的磷脂后流体类型以及所对应的蛋白质量分数的变化。为此,用幂律方程描述剪切速率与剪切应力之间的关系, $\tau = K\gamma^n$,式中 τ 为剪切应力, γ 为剪切速率, K 为黏性常数, n 为流动特性指数。当 τ 和 γ 呈线性关系,即 $n = 1$ 时,该溶液表现为牛顿流体;当 τ 和 γ 呈非线性关系时,溶液表现为非牛顿流体,且 $n > 1$ 时为胀塑性流体,表现为剪切稠化, $n < 1$ 时为假塑性流体,表现为剪切稀化。

表3为用幂律定律对图4中的所有曲线进行拟合后,得到的一系列 $\tau = K\gamma^n$ 方程中的 n 的变化:未复合磷脂的SPI溶液在大豆蛋白质量分数为1%~4%时, n 均大于1,当大豆蛋白质量分数达到5%时, $n < 1$;而复合磷脂的质量比为0.01时,大豆蛋白质量分数为3%时 $n < 1$;复合磷脂质量比为0.1时,大豆蛋白质量分数为2%时 $n < 1$,这表明随着磷脂复合量的增加SPI溶液由弱剪切稠化流体转变为近牛顿流体的大豆蛋白质量分数拐点降低了。另外,在未复合磷脂的大豆蛋白质量分数达到8%时 n 偏离1的程度突增($n = 0.5590$),流体类型由近牛顿流体转变为假塑性流体,随着磷脂复合量的继续增加,流体类型变化所对应的质量分数拐点不变,但当磷脂与大豆蛋白的复合质量比为1时,质量分数拐点降低为5%,且5%~7%均表现为假塑性流体,当大豆蛋白质量分数增加到8%时 n 为0.4566,结合图4d可知,此时流体转变为粘塑性流体。

图5为复合磷脂前、后溶液表观粘度随着大豆蛋白质量分数的变化。由图可知,溶液的表观粘度也随着大豆蛋白质量分数的增加逐步增大,这与Arno等^[19]研究一致:同一种蛋白样品,质量分数大的蛋白具有较大的粘度和较大的体积分数。但复合磷脂后,在大豆蛋白质量分数较小时($\leq 4%$)磷脂的复合对体系粘度的影响不大,这可能是由于大豆蛋白在此质量分数范围内溶液体系中主要存在的是水之间相互作用力,磷脂的复合不足以改变体系中

表 3 幂律方程中 n 变化Tab.3 Change of n value derived from index-law equation

大豆蛋白 质量分数/%	磷脂与大豆蛋白质量比			
	0	0.01	0.1	1
1	1.157 2	1.176 7	1.234 4	1.176 7
2	1.067 5	1.100 4	1.094 4	1.094 5
3	1.056 1	1.027 3	0.997 3	0.998 4
4	1.010 9	0.987 4	0.966 4	0.898 0
5	0.815 1	0.918 9	0.872 4	0.754 6
6	0.715 1	0.871 6	0.812 6	0.637 4
7	0.864 0	0.860 5	0.812 6	0.506 1
8	0.559 0	0.753 0	0.612 1	0.456 6

的主导作用力。而大豆蛋白质量分数大于 4% 时, 当磷脂复合量较低, 磷脂与大豆蛋白的质量比不高于 0.01 时磷脂的复合可以降低体系粘度, 而当复合质量比增加到 0.1 时不改变体系粘度, 但是当复合质量比继续增大到 1 时, 大豆蛋白各质量分数下粘度均显著增强。这可能是由于适量磷脂的复合增强了蛋白表面负电性, 使得大豆蛋白颗粒与水作用增强, 溶液粘度降低, 但是当磷脂复合质量增大到一定程度时粘度增大可以用 Dreja 等^[20] 提出的 conformation change 模型理论, 磷脂以胶束形式结合到大豆蛋白表面, 一个胶束拥有较高的电荷密度, 因此大豆蛋白结合一个胶束时, 静电压力的作用促使高密度的电荷在蛋白表面尽可能均匀分散。这促使大豆蛋白通过自身结构展开, 暴露更多的疏水区域与磷脂结合, 进而分散高密度磷脂胶束带来的电荷。蛋白结构的扩展变化导致蛋白的流体力学半径增

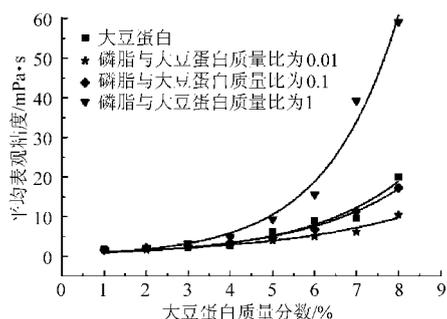


图 5 不同磷脂复合量下平均表观粘度随大豆蛋白质量分数的变化

Fig.5 Change of average apparent viscosity with increasing of protein concentration at different lecithin complex contents

大, 与水作用增强, 溶液粘度增大。

3 结束语

复合磷脂后大豆分离蛋白溶液的理化性质和流体性质发生了一定的变化, 复合质量比达到 1 时蛋白颗粒表面负电性增强, 可溶性蛋白质含量对 pH 值的依赖性降低; 溶液中蛋白颗粒粒径随着复合量的增加呈现增大的趋势; 相应的溶液粘度及流体类型也随之发生变化; 流体类型随蛋白质量分数变化的拐点因复合量的增加而降低, 且蛋白质量分数较小时磷脂的复合不改变溶液粘度, 而蛋白质量分数较大时, 适量磷脂的复合可以降低溶液粘度。因此, 蛋白溶液中蛋白粒子理化性质及溶液的流体特性变化表明磷脂的复合对大豆分离蛋白功能性将产生很大的影响, 这将为食品工业中大豆分离蛋白专一性生产提供参考。

参 考 文 献

- 1 王喜波, 迟玉杰. 大豆蛋白超声磷酸化加工工艺的 Box - Behnken 模型优化 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 130 ~ 134. Wang Xibo, Chi Yujie. Optimizatiion on the technology of ultrasound-phosphorylation soybean proteins by Box - Behnken model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 130 ~ 134. (in Chinese)
- 2 宋兰, 张敏. 氢化大豆卵磷脂 Pd/C 催化剂制备工艺优化 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 132 ~ 135, 162. Song Lan, Zhang Min. Preparation process optimization of Pd/C catalysts for hydrogenation soy lecithin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 132 ~ 135, 162. (in Chinese)
- 3 van Nieuwenhuyzen W, Szuhaj B F. Effects of lecithins and proteins on the stability of emulsions [J]. Fett/Lipid, 1998, 100(7): 282 ~ 291.
- 4 Ohtsuru M, Kito M, Takeuchi Y. Association of phosphatidylcholine with soybean protein [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1976, 40(11): 2 261 ~ 2 266.
- 5 Kanamoto R, Ohtsuru M, Kito M. Diversity of the soybean protein-phosphatidylcholine complex [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1977, 41(10): 2 021 ~ 2 026.
- 6 Ohtsuru M, Yamashita Y, Kanamoto R. Association of phosphatidylcholine with soybean 7S globulin and its effect on the protein conformation [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1979, 43(4): 765 ~ 770.
- 7 Ohtsuru M, Kito M. Association of phosphatidylcholine with soybean 11S globulin [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1983, 47(8): 1 907 ~ 1 908.
- 8 Beckwith A C. Interaction of phosphatidylcholine vesicles with soybean 7S and 11S globulin proteins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1984, 32(6): 1 397 ~ 1 402.
- 9 Hirotsuka M, Taniguchi H, Narita H, et al. Increase in emulsification activity of soy lecithin-soy protein complex by ethanol and

- heat treatments [J]. *Journal of Food Science*, 1984,49(4):1 105 ~ 1 110.
- 10 Scuriatti M P, Tomas M C, Wagner J R. Influence of soybean protein isolates-phosphatidylcholine interaction on the stability of oil-in-water emulsions [J]. *Journal of the American Oil Chemists*, 2003,80(11):1 093 ~ 1 100.
- 11 Comas D I, Wagner J R, Tomás M C. Creaming stability of oil in water(O/W) emulsions: influence of pH on soybean protein-lecithin interaction [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006,20(7):990 ~ 996.
- 12 Le T T, EL-Bakry M, Neiryck N. Hydrophilic lecithins protect milk proteins against heat-induced aggregation [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007,60(2):167 ~ 173.
- 13 贾娜,刘宁.大豆磷脂对牛乳蛋白乳液热稳定性的影响[J]. *中国乳品工业*,2010,38(4):42 ~ 45.
Jia Na, Liu Ning. Effect of soybean phospholipid on the heat stability of milk protein emulsions [J]. *China Dairy Industry*,2010,38(4):42 ~ 45. (in Chinese)
- 14 Sorgentini D A, Wagner J R, Añón M C. Effect of thermal treatment of soy protein isolate on the characteristics and structure-function relationship of soluble and insoluble fractions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995,43(9): 2 471 ~ 2 479.
- 15 Nakamura R, Mizutani R, Yano M, et al. Enhancement of emulsifying properties of protein by sonicating with egg yolk lecithin [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988,36(4): 729 ~ 732.
- 16 Chen W S, Soucie W G. Modification of surface charges of soy protein by phospholipids [J]. *Journal of the American Oil Chemists*, 1985,62(12): 1 686 ~ 1 689.
- 17 Malhotra A, Coupland J N. The effect of surfactants on the solubility, Zeta potential, and viscosity of soy protein isolates [J]. *Food Hydrocolloids*, 2004,18(1):101 ~ 108.
- 18 Jorge R W, Delia A S, Maria C A. Effect of physical and chemical factors on rheological behavior of commercial soy protein isolates: protein concentration, water imbibing capacity, salt addition, and thermal treatment [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1992,40(10): 1 930 ~ 1 937.
- 19 Arno C A, Mireille W, Els H A H, et al. Acid-induced cold gelation of globular proteins: effect of protein aggregate characteristics and disulfide bonding on rheological properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004,52(3): 623 ~ 631.
- 20 Dreja M, Heine K, Tieke B, et al. Rheological study of the pH-dependence of interactions between gelatin and anionic surfactants: flow behavior and gelation [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1996, 274(11): 1 044 ~ 1 053.

~~~~~

(上接第 189 页)

- 23 李江阔,纪淑娟,魏宝东,等. 1-MCP 对南果梨冷藏防褐保鲜作用的初探[J]. *保鲜与加工*, 2007, 25(4): 7 ~ 11.  
Li Jiangkuo, Ji Shujuan, Wei Baodong, et al. Primary study of 1-MCP on browning-inhibiting and freshmen-keeping's mechanism of Nanguo pear during 0°C storage[J]. *Storage and Process*, 2007, 25(4):7 ~ 11. (in Chinese)
- 24 张鹏,李江阔,陈绍慧,等. 1-MCP 结合冰温贮藏磨盘柿的防褐保鲜效果[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 108 ~ 113.  
Zhang Peng, Li Jiangkuo, Chen Shaohui, et al. Effect of 1-MCP combined with controlled freezing point storage on browning preventing and freshness-keeping of mopan persimmon[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 108 ~ 113. (in Chinese)
- 25 Sisler E C, Alwan T, Goren R, et al. 1-substituted cyclopropenes: effective blocking agents for ethylene action in plants[J]. *Plant Growth Regulation*, 2003,40(3): 223 ~ 228.
- 26 Sisle E C, Serek M, Roh Kee-An, et al. The effect of chemical structure on the antagonism by cyclopropenes of ethylene responses in banana[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 33(2): 107 ~ 110.

~~~~~

(上接第 201 页)

- 15 Virag T. Simulation of continuous drying processed by integral equations[J]. *Chemical Engineering Science*, 1989,44(7):1 529 ~ 1 538.
- 16 张德胜,施卫东,张华,等. 轴流泵叶轮端壁区流动特性数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 73 ~ 77.
Zhang Dsheng, Shi Weidong, Zhang Hua, et al. Numerical simulation of flow field characteristics in tip clearance region of axial-flow impeller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 73 ~ 77. (in Chinese)
- 17 叶晓琰,田莹莹,丁压娜,等. 高剪切匀浆泵两相流动的数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 407 ~ 411.
Ye Xiaoyan, Tian Yingying, Ding Ya'na, et al. Numerical simulation of two-phase flow in high shear pulp pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 407 ~ 411. (in Chinese)
- 18 孙贇,刘兴静,张宏宇,等. 涡轮反应器气固两相流动反应 CFD 模型建立[J]. *农业机械学报*,2013,44(6):194 ~ 200.
Sun Yun, Liu Xingjing, Zhang Hongyu, et al. Development of gas-solid two-phase flow-reaction CFD model for vortex reactor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(6): 194 ~ 200. (in Chinese)