

挤压处理对豌豆蛋白功能特性及结构的影响

Effect of extrusion treatment on the functional properties and structure of pea protein

张百汝^{1,2} 王斌^{1,2} 王琨^{1,2} 董宇晴^{1,2} 崔波^{1,2}

ZHANG Bai-ru^{1,2} WANG Bin^{1,2} WANG Kun^{1,2} DONG Yu-qing^{1,2} CUI Bo^{1,2}

(1. 齐鲁工业大学[山东省科学院]生物基材料及绿色造纸国家重点实验室, 山东 济南

250353; 2. 齐鲁工业大学[山东省科学院]食品科学与工程学院, 山东 济南 250353)

(1. State key Laboratory of Biobased Material and Green Papermaking, Qilu University of Technology

[Shandong Academy of Sciences], Jinan, Shandong 250353, China; 2. College of Food Science and

Engineering, Qilu University of Technology [Shandong Academy of Sciences], Jinan, Shandong 250353, China)

摘要:目的:研究挤压处理对豌豆蛋白功能特性及结构的影响,提高豌豆蛋白的功能性质。方法:采用全自动测色色差计对豌豆蛋白挤出物颜色的变化进行分析,用化学分析法对蛋白质的持水性和乳化特性进行测试,用扫描电子显微镜观察豌豆蛋白及其挤出物的微观结构,利用傅里叶变换红外光谱仪分析挤出物的二级结构变化。结果:豌豆蛋白经挤压处理后,颜色无显著差异,产品色泽良好,持水性显著下降($P < 0.05$),乳化性和乳化稳定性显著增加($P < 0.05$)。挤压处理后微观结构改变明显,产生蛋白聚集体,结构紧密。挤压处理后无新的特征峰出现,但二级结构各组分之间发生转化, β -折叠、 α -螺旋结构向 β -转角、无规卷曲结构转化,结构稳定性增加。结论:豌豆蛋白经过挤压处理后,保留了原来的产品色泽,乳化特性显著改善,结构致密,稳定性得到了提高。

关键词:豌豆蛋白;挤压处理;功能特性;结构

Abstract: Objective: This study focuses on the effects of twin-screw extrusion on the functional properties and structure of pea protein. **Methods:** The color change of pea protein extrudates were analyzed by automatic colorimeter, the water holding capacity and emulsifying characteristics of pea protein were analyzed by chemical analysis. The microstructure of pea protein and its extrudates were observed by scanning electron microscope, and the secondary structure of the extrudates were analyzed by Fourier

transform infrared spectroscopy. **Results:** After extrusion treatment, no significant difference was found in the color of pea protein, indicating that the pea protein had a better product color and the water holding capacity was significantly reduced ($P < 0.05$), with the emulsibility and emulsification stability significantly increased ($P < 0.05$). Scanning electron microscope showed that the microstructure changed obviously, resulting in protein aggregates with compact structure. The infrared spectrum showed that no new characteristic peaks appeared after extrusion treatment, but the secondary structure conversion occurred; β -sheet and α -helix structure transformed into β -turn and random coil structure, and the structural stability increased. **Conclusion:** After extrusion treatment, the pea protein retained its original product color, emulsification characteristics were significantly improved, the structure was dense and stability was enhanced.

Keywords: pea protein; extrusion treatment; functional properties; structure

豌豆是世界重要的栽培作物之一,富含人体所需要的各种全面而均衡的营养物质^[1]。豌豆蛋白作为豌豆主要组分之一,占比 23%~25%,富含赖氨酸,含有人体所需的 18 种氨基酸,属于全价蛋白质^[2-3]。与动物蛋白相比,豌豆蛋白不含胆固醇,致敏性低,还具有降低糖尿病和心脑血管疾病风险的作用^[4]。目前,豌豆蛋白作为副产物并未得到有效的精深加工,造成了蛋白资源的浪费^[5]。另外豌豆蛋白起泡性和乳化性等特性较差,也限制了其在食品工业中的应用^[6]。随着蛋白质需求的增大,越来越多的研究者采用不同的改性方法对豌豆蛋白进行了深入研究,以此来提高豌豆蛋白的功能性质^[7-8]。

目前,针对蛋白质的改性方法主要有物理法、化学法和酶法,最常用的是物理改性。物理改性主要是通过挤

基金项目:国家重点研发计划课题(编号:2019YFD1002704);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(编号:2019JZZY010722);泰山学者工程专项基金(编号:ts201712060)

作者简介:张百汝,女,齐鲁工业大学在读硕士研究生。

通信作者:崔波(1971—),男,齐鲁工业大学教授,博士。

E-mail: cuiborr@163.com

收稿日期:2021-08-04

压^[9]、高压均质^[10]和超声^[11]等方法来破坏蛋白质的结构,达到改善蛋白质功能特性的目的。其中,挤压技术是一种高温短时的加工技术,具有高生产率、低成本、无污染和多功能性等优点^[9]。在挤压过程中,物料受到高温、高压和剪切力的作用,其结构会发生变化,从而改变蛋白质的功能特性。沈宁等^[12]采用双螺杆挤压确定了大豆蛋白的最佳工艺,挤压温度 150 ℃,水分含量 45%,证实了挤压温度对蛋白质消化率的影响大于水分含量;赵学伟等^[13]研究了小米蛋白在不同温度和物料水分条件下挤压后蛋白质溶解度的变化,挤压后溶解度下降,并表明疏水相互作用和二硫键是溶解度下降的主要原因;Beck 等^[14]采用低水分含量挤压成功制备了豌豆分离蛋白膨化产品,膨化指数可达 13;Palanisamy 等^[15]研究表明,利用羽扇豆蛋白生产高水分挤压肉类似物是可行的,可以满足消费者的需求。但国内外对豌豆蛋白的挤压加工研究较少,且仅单一研究中低水分含量(≤40%)或者高水分含量(>40%)对其影响。研究拟通过改变物料含水量(质量分数 40%~60%)来探究挤压处理对豌豆蛋白色度、持水性、乳化特性、微观结构和二级结构的影响,旨在为豌豆蛋白改性提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

豌豆蛋白:蛋白含量 82.1%(以干基计),山东烟台双塔食品股份有限公司;

磷酸二氢钠、磷酸氢二钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

溴化钾:光谱纯,上海麦克林生化科技有限公司;

大豆油:金龙鱼,益海粮油工业有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

双螺杆挤压试验机:SLG35-A 型,济南大亿机械有限公司;

水分测定仪:HE53/02 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

全自动测色色差计:ADCI-60-C 型,北京辰泰克仪器技术有限公司;

高速低温离心机:CR21N 型,日本 Hitachi 公司;

高速分散均质机:FJ200 型,上海沪析实业有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-6100 型,上海元析仪器有限公司;

扫描电子显微镜:Fei Quanta 200 型,美国 FEI 公司;

傅里叶变换红外光谱仪:Frontier 型,美国 PerkinElmer 公司;

荧光光度计:F-2700 型,日本 Hitachi 公司。

1.2 方 法

1.2.1 豌豆蛋白挤出物制备

称取一定质量的豌豆蛋白加蒸馏水调节含水量分别为 40%,50%,60%(质量分数,以蛋白质干基计),放置 24 h 平衡水分,设置挤压条件,主机螺杆转速 300 r/min,喂料区螺杆转速 200 r/min,挤压温度从第一区到第五区分别为 175,140,120,100,60 ℃。挤压处理后的样品于热风干燥箱中 55 ℃烘干至恒重,研磨成粉,过 80 目筛,保存备用。

1.2.2 色度的测定 参照文献^[16],用全自动色差计测量豌豆蛋白及其挤出物的色度。 $+a$ 表示红色, $-a$ 表示绿色, $+b$ 表示黄色, $-b$ 表示蓝色, L 表示颜色的明亮度, L 值越大,表示挤出物越明亮。色差计用标准白瓷板校准,校准值分别为 $L^* = 91.68$, $a^* = 8.27$, $b^* = 4.33$ 。通过式(1)计算总色差。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_s^*)^2 + (a^* - a_s^*)^2 + (b^* - b_s^*)^2}, \quad (1)$$

式中:

L_s^* ——挤压处理后样品的明亮度;

a_s^* ——挤压处理后样品的 a^* 值;

b_s^* ——挤压处理后样品的 b^* 值。

1.2.3 持水性的测定 参照文献^[17],准确称取 1.000 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 去离子水,磁力搅拌 10 min,分散均匀,室温下静置 40 min 使样品充分持水,然后 4 000 r/min 离心 20 min,弃去上清液,将管内的水吸干,称量离心管与沉淀的总重量,按式(2)计算持水性(Water Holding Capacity, WHC)。

$$W_{HC} = \frac{m_2 - m_1}{m}, \quad (2)$$

式中:

W_{HC} ——样品持水性,g/g;

m ——样品质量,g;

m_1 ——离心管与样品的质量,g;

m_2 ——离心后离心管与沉淀的质量,g。

1.2.4 乳化特性的测定 参照文献^[18],准确称取豌豆蛋白及其挤出物样品 0.300 g 于 100 mL 烧杯中,加入 30 mL 蒸馏水,磁力搅拌 10 min 使样品充分分散,加入 10 mL 大豆油,高速均质机 10 000 r/min 均质 2 min。在均质完成后的 0 min 和 10 min,分别从烧杯底部吸取 50 μ L 溶液(在相同位置)用 5 mL 0.1% 十二烷基硫酸钠(SDS)溶液稀释,以 SDS 溶液为空白,稀释液立即振荡并测量样品在 500 nm 处的吸光度。分别按式(3)和式(4)计算乳化活性(Emulsification Activity Index, EAI)和乳化稳定性(Emulsion Stability Index, ESI)。

$$E_{AI} = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{10\,000 \times C \times \varphi}, \quad (3)$$

$$E_{SI} = \frac{A_0}{A_0 - A_{10}} \times \Delta T, \quad (4)$$

式中:

E_{AI} ——乳化性, m^2/g ;

- E_{SI} ——乳化稳定性, min;
- N ——稀释倍数, 101;
- A_0 ——均质 0 min 时乳液的吸光度;
- A_{10} ——均质完成后 10 min 时乳液的吸光度;
- C ——乳状液形成前豌豆蛋白的浓度, g/mL;
- Φ ——乳状液中油相所占体积, 1/4;
- ΔT ——10 min。

1.2.5 扫描电子显微镜 参照文献[19], 将挤压的新鲜样品切成薄片, 用导电胶将样品固定在样品台上, 表面进行喷金处理, 于 500 倍下观察样品的微观结构。

1.2.6 傅里叶变换红外光谱 参照文献[20], 取研磨过后的样品和干燥溴化钾于石英研钵中研磨并压片, $m_{\text{样品}} : m_{\text{溴化钾}} = 1 : 100$, 扫描范围为 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$, 扫描次数为 16 次, 分辨率为 4 cm^{-1} 。利用 OMNIC 8.0 软件对红外图谱进行傅里叶去卷积。

1.3 数据处理分析

采用 SPSS 20.0 软件中的 Duncan 法进行数据的差异性分析, Origin 8.5 作图, PeakFit v4.12 进行高斯峰的拟合计算二级结构中各组分含量。

2 结果与分析

2.1 色差分析

挤压过程中含水量对豌豆蛋白颜色指数 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 的影响如表 1 所示。色泽可以反映挤压过程中的化学反应和营养变化程度。结果表明, 豌豆蛋白原料的 L^* 、 a^* 和 b^* 分别为 81.01, 17.19, 29.77, 挤出物明亮度 L^* 显著下降 ($P < 0.05$), 其范围为 76.56~81.01, a^* 和 b^* 值显著上升 ($P < 0.05$), 分别为 17.19~18.33 和 29.77~31.18。豌豆蛋白原料及其挤出物的综合色差 ΔE 无显著差异 ($P > 0.05$), 表明豌豆蛋白经过挤压处理仍可以保持较好的产品色泽。

当含水量从 40% 增加至 50% 时, 亮度值 L^* 逐渐增加, 当含水量增加到 60% 时, 亮度值显著下降 ($P < 0.05$)。说明含水量为 40% 和 50% 时可以生产出更明亮的产品, 但过高的含水量 (60%) 不利于产品的亮度。豌豆蛋白挤出物的亮度下降是由于游离氨基与还原糖发生美拉德反应引起的^[21]。Wang 等^[22] 研究结果显示含水量对豌豆蛋白挤出物色泽的影响与其褐变程度有关, 是因为温度和

表 1 挤压前后豌豆蛋白颜色变化[†]

Table 1 Changes of chromaticity values of pea protein before and after extrusion

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
原料	81.01±0.10 ^a	17.19±0.21 ^c	29.77±0.44 ^c	36.01±0.36 ^a
40%	76.56±0.10 ^d	18.02±0.08 ^b	30.53±0.34 ^b	34.81±0.30 ^b
50%	78.84±0.02 ^b	17.99±0.07 ^b	30.42±0.08 ^b	35.74±0.08 ^a
60%	77.61±0.26 ^c	18.33±0.20 ^a	31.18±0.30 ^a	35.91±0.24 ^a

[†] 同一列数据后字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

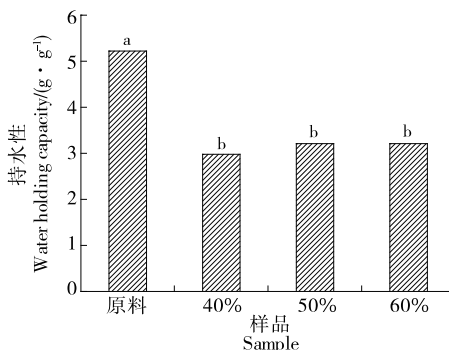
湿度对豌豆蛋白产品的非酶促褐变有影响, 这些产品中含有大量的蛋白质和可溶性碳水化合物。Jebalia 等^[23] 的研究有相似结果, 豌豆基淀粉-蛋白共混物挤压后的 L^* 低于原材料, 这一现象是美拉德反应导致的。

2.2 持水性

由图 1 可知, 挤压处理后豌豆蛋白的持水性显著下降 ($P < 0.05$), 但含水量对持水性无显著影响 ($P > 0.05$)。蛋白质的持水性是蛋白质功能特性的一种, 是指干燥蛋白质直接与水作用时保持水分的能力, 其本质是蛋白质分子物理截留^[24]。在挤压处理过程中, 豌豆蛋白经加热, 发生变性, 由原本不规则的和体积较小的颗粒态变成熔融状态。该状态下, 蛋白质天然网络结构被破坏, 蛋白质完全变性, 物料在高压作用下随着螺杆运动的方向向前移动, 豌豆蛋白形成蛋白质聚集体, 蛋白质与蛋白质之间的缝隙被压缩, 形成了具有较少气孔状态的致密结构。当蛋白质与水直接作用时, 水分子较难进入, 蛋白质分子物理截留作用下降, 持水性下降^[25-26]。

2.3 乳化特性

豌豆蛋白和豌豆蛋白挤出物的 EAI 和 ESI 的变化如图 2 所示。挤压处理后, 豌豆蛋白的 EAI 和 ESI 显著上升 ($P < 0.05$)。这主要是因为挤压处理过程中, 高温和剪切力会破坏维持蛋白质的次级键, 蛋白质变性伸展, 多肽链被解聚成小分子肽和游离氨基酸^[9]。在挤压机内, 蛋白质重新定向排列, 蛋白质-蛋白质之间相互作用, 形成蛋白质聚集体^[27]。在高速均质过程中, 蛋白质聚集体受到高剪切力的破坏变成小分子物质, 使得原先包裹在蛋白质聚集体内部的疏水性基团暴露出来, 并与脂肪分子结合, 亲水性基团与水分子结合, 从而形成一层薄膜覆在脂肪球表面, 形成一个稳定的水包油体系, 从而提高了豌豆蛋白的乳化性及乳化稳定性^[28]。当含水量为 40% 时, 蛋白质在高温作用下变性较大, 暴露出更多的疏水性基团, 因此 EAI 增大; 当含水量为 60% 时, 物料与物料、物料与机筒的摩擦减少, 豌豆蛋白在挤压机的停留时间



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 挤压处理前后豌豆蛋白的持水性

Figure 1 Water holding capacity of pea protein before and after extrusion treatment

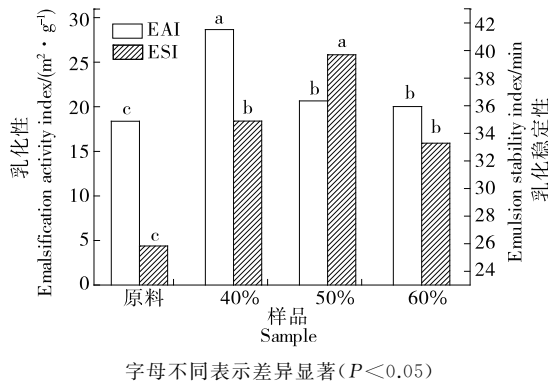


图 2 挤压处理前后豌豆蛋白的乳化活性及乳化稳定性
Figure 2 The emulsifying activity and emulsifying stability of pea protein before and after extrusion treatment

减少^[29],蛋白质变性较小,疏水性基团数量减少,EAI和ESI均减小。Bueno等^[28]研究表明,挤压蒸煮会造成蛋白质的部分热变性,从而提高了大豆分离蛋白和果胶共混物的乳化特性。

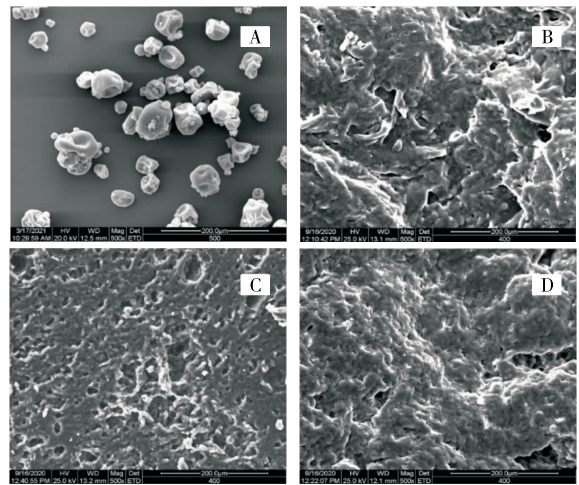
2.4 扫描电子显微镜

如图3所示,豌豆蛋白原料呈明显的颗粒状态,大小和形状不规则,其表面或光滑,或有凹陷^[30]。经过挤压处理后,豌豆蛋白由颗粒状态变为聚集状态且形状发生明显变化,表面凹凸感增强,且有气孔结构出现。在挤压过程中,物料在机筒内熔融,在高温高压下向前运动,在模口处温度和压力均急剧降低,物料中的水分迅速汽化,因而会形成明显的气孔结构^[31]。当含水量为40%时,豌豆蛋白挤出物表面的气孔数量最少,且分布极不均匀。随着含水量的增加,气孔数量不断增加,分布较为均匀。当含水量为50%时,气孔形成蜂窝状结构。

2.5 傅里叶变换红外光谱

如图4所示,随着含水量的增加,挤压处理后蛋白质未产生新的特征吸收峰。在3 600~3 100 cm⁻¹范围内,所有样品均出现一宽峰,主要是一OH、—NH和—CH的伸缩振动引起的;在2 925 cm⁻¹附近均出现一个尖峰,主要是由饱和C上的一CH伸缩振动引起的^[32]。

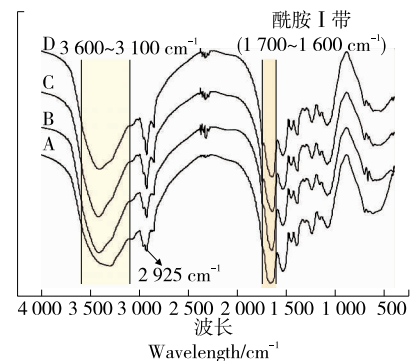
从表2可以看出,豌豆蛋白主要是以β结构形式存在的,Jackson等^[33]和Carbonaro等^[34]证实了由β结构组成的聚集体是稳定构象。豌豆分离蛋白经过挤压处理后,β-折叠结构含量由未挤压的47.91%减少到40.91%,且随着含水量的减少而减少,β-转角含量由24.76%增加到30.95%,无规卷曲含量由12.24%增加到14.76%,α-螺旋含量由15.09%减少到12.99%,说明在挤压过程中,β-折叠和α-螺旋是向β-转角和无规卷曲结构转变的。在高温加热过程中,由于蛋白质变性,存在于其分子内部的氢键断裂,蛋白质发生解螺旋,所以α-螺旋含量下降。同时,蛋白质解螺旋后,蛋白质结构由有序趋向于无序,无



A. 原料 B、C、D. 物料含水量分别为40%、50%、60%时制备的样品

图3 挤压处理前后豌豆蛋白微观结构

Figure 3 The microstructure of pea protein before and after extrusion treatment (500×)



A. 原料 B、C、D. 物料含水量分别为40%、50%、60%时制备的样品

图4 豌豆蛋白及其挤出物的红外谱图

Figure 4 Infrared spectra of pea protein and its extrudates

表2 挤压处理前后豌豆蛋白二级结构组分含量变化
Table 2 Changes in the content of secondary structure components of pea protein before and after extrusion treatment %

样品	β-折叠	α-螺旋	β-转角	无规卷曲
原料	47.91	15.09	24.76	12.24
40%	40.97	13.47	30.95	14.61
50%	42.52	13.59	29.13	14.76
60%	45.75	12.99	27.19	14.07

规卷曲含量上升。β-折叠含量下降主要是因为挤压处理形成的蛋白质聚集体,使得变性后暴露的疏水性基团被覆盖。

3 结论

挤压加工技术是一种适用性高、成本低、应用范围广泛的物理改性手段。豌豆蛋白经过挤压处理后,保持了产品原有的色泽,持水性下降,乳化性和乳化稳定性显著提高,形成了蛋白质聚集体,结构稳定性增强。因此,挤压处理可以有效改善豌豆蛋白的理化特性。为了探究豌豆蛋白挤压机理,有必要进一步研究挤压温度和螺杆转速对蛋白质理化特性和结构的影响。

参考文献

- [1] 何希强, 肖怀秋, 王穗萍. 豌豆蛋白质起泡、乳化功能特性研究[J]. 粮油加工, 2008(4): 100-103.
HE Xi-qiang, XIAO Huai-qiu, WANG Sui-ping. Study on the functional properties of pea protein foaming and emulsification[J]. Cereals and Oils Processing, 2008(4): 100-103.
- [2] 朱建华. 豌豆蛋白质的特性[J]. 商业科技开发, 1996(4): 32-33.
ZHU Jian-hua. Characteristics of pea protein [J]. Commercial Science and Technology Development, 1996(4): 32-33.
- [3] POL M V, HRISTOV A N, ZAMAN S, et al. Peas can replace soybean meal and corn grain in dairy cow diets[J]. Journal of Dairy Science, 2008, 91(2): 698-703.
- [4] BOYE J I, AKSAY S, ROUFIK S, et al. Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques[J]. Food Research International, 2009, 43(2): 537-546.
- [5] 师伟伟. 豌豆粉丝副产物中蛋白质的提取及性能改善[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 8-10.
SHI Wei-wei. The extraction and property improvement of protein from pea starch noodles' by-product[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 8-10.
- [6] LIU Y H, WANG D Z, WANG J H, et al. Functional properties and structural characteristics of phosphorylated pea protein isolate[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(5): 2 002-2 010.
- [7] YANK K T, LIN R H, ZHANG S C, et al. Ultrasound-modified interfacial properties and crystallization behavior of aerated emulsions fabricated with pH-shifting treated pea protein[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130536.
- [8] ERTUGRUL U, NAMLI S, TAS O, et al. Pea protein properties are altered following glycation by microwave heating[J]. LWT, 2021, 150: 111939.
- [9] LI M, LEE T C. Effect of extrusion temperature on the solubility and molecular weight of lentil bean flour proteins containing low cysteine residues[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(3): 880-884.
- [10] 郭增旺, 郭亚男, 李柏良, 等. 高压均质条件下大豆蛋白热聚集体结构和乳化特性研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 351-358, 374.
GUO Zeng-wang, GUO Ya-nan, LI Bo-liang, et al. Effect of high-pressure homogenization on structure and emulsification characteristics of soybean protein thermal aggregates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 351-358, 374.
- [11] 王营娟. 超声对鹰嘴豆分离蛋白理化和功能特性的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2021: 3-11.
WANG Ying-juan. Effects of ultrasound on the physicochemical and functional properties of chickpea protein [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021: 3-11.
- [12] 沈宁, 杨光, 吴景, 等. 双螺杆挤压对大豆蛋白质的影响[J]. 食品工业科技, 2007(7): 69-71.
SHEN Ning, YANG Guang, WU Jing, et al. Effects of twin-screw extrusion on soybean protein[J]. Food Industry Science and Technology, 2007(7): 69-71.
- [13] 赵学伟, 魏益民, 张波. 挤压对小米蛋白溶解性和分子量的影响[J]. 中国粮油学报, 2006(2): 38-43.
ZHAO Xue-wei, WEI Yi-min, ZHANG Bo. Effect of extrusion on solubility and molecular weight distribution of millet protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006(2): 38-43.
- [14] BECK S M, KNOERZER K, ARCOT J. Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 166-174.
- [15] PALANISAMY M, FRANKE K, BERGER R G, et al. High moisture extrusion of lupin protein: influence of extrusion parameters on extruder responses and product properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2 175-2 185.
- [16] SOTILLO E, HETTLARACHCHY N S. Corn meal-sunflower meal extrudates and their physicochemical properties[J]. Journal of Food Science, 1994, 59(2): 432-435.
- [17] 银玉容, 肖凯军, 刘婉乔. 芝麻蛋白发泡性、持水力的理论研究[J]. 食品与发酵工业, 1996(3): 33-36.
YIN Yu-rong, XIAO Kai-jun, LIU Wan-qiao. Theoretical research on the foaming properties and water holding capacity of sesame protein[J]. Food and Fermentation Industries, 1996(3): 33-36.
- [18] JIANG J, CHEN J, XIONG Y L L. Structural and emulsifying properties of soy protein isolate subjected to acid and alkaline pH-shifting processes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(16): 7 576-7 583.
- [19] 王丽丽, 赵思明, 林亲录, 等. 冷链米饭多尺度结构的变化及慢消化淀粉形成机制[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 18-23, 42.
WANG Li-li, ZHAO Si-ming, LIN Qin-lu, et al. Multi-scale structural changes and slowly digestible starch formation of cold-chain cooked rice[J]. Food and Machinery, 2021, 37(6): 18-23, 42.
- [20] BECK S M, KNOERZER K, SELLAHEWA J, et al. Effect of different heat-treatment times and applied shear on secondary structure, molecular weight distribution, solubility and rheological properties of pea protein isolate as investigated by capillary rheo-

- metry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 208: 66-76.
- [21] 郭树国, 刘强, 付广艳, 等. 挤压膨化过程中大豆化学成分变化分析[J]. *粮油加工*, 2006(7): 60-61.
GUO Shu-guo, LIU Qiang, FU Guang-yan, et al. Analysis of soybean chemical composition changes during extrusion process[J]. *Cereals and Oils Processing*, 2006(7): 60-61.
- [22] WANG N, BHIRUD P R, TYLER R T. Extrusion texturization of air-classified pea protein[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(3): 509-513.
- [23] JEBALIA I, MAIGRET J E, RÉGUERRE A L, et al. Morphology and mechanical behaviour of pea-based starch-protein composites obtained by extrusion [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115086.
- [24] 耿军凤, 张丽芬, 陈复生. 超声波辅助提取对花生蛋白结构与功能特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(9): 61-69.
GENG Jun-feng, ZHANG Li-fen, CHEN Fu-sheng. Effect of ultrasonic-assisted extraction on the structure and functional properties of peanut protein[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(9): 61-69.
- [25] WU H W, WANG Q, MA T Z, et al. Comparative studies on the functional properties of various protein concentrate preparations of peanut protein [J]. *Food Research International*, 2008, 42(3): 343-348.
- [26] RESENDIZ-VAZQUEZ J A, ULLOA J A, URIAS-SILVAS J E, et al. Effect of high-intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2017, 37: 436-444.
- [27] ZHENG H G, YANG X Q, TANG C H, et al. Preparation of soluble soybean protein aggregates (SSPA) from insoluble soybean protein concentrates (SPC) and its functional properties[J]. *Food Research International*, 2007, 41(2): 154-164.
- [28] BUENO A S, PEREIRA C M, MENEGASSI B, et al. Effect of extrusion on the emulsifying properties of soybean proteins and pectin mixtures modelled by response surface methodology [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 90(4): 504-510.
- [29] CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B, et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 96(2): 208-213.
- [30] 郭莲东, 徐丽, 欧才智, 等. 小米蛋白的分子组成及结构特性[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 201-206.
GUO Lian-dong, XU Li, OU Cai-zhi, et al. Molecular Compositions and structural properties of proteins in millet [J]. *Food Science*, 2019, 40(24): 201-206.
- [31] WU M, SUN Y, BI C H, et al. Effects of extrusion conditions on the physicochemical properties of soy protein/gluten composite[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(4): 205-210.
- [32] MOZAFARPOUR R, KOOCHKEI A, MILANI E, et al. Extruded soy protein as a novel emulsifier: Structure, interfacial activity and emulsifying property[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 361-373.
- [33] JACKSON M, MANTSCH H H. The use and misuse of FTIR spectroscopy in the determination of protein structure[J]. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 1995, 30(2): 95-120.
- [34] CARBONARO M, MASELLI P, NUCARA A. Relationship between digestibility and secondary structure of raw and thermally treated legume proteins: A Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopic study[J]. *Amino Acids*, 2012, 43(2): 911-921.
-
- (上接第 31 页)
- [20] 林龙镇, 邹卫玲, 李安章, 等. 产酸、耐酸乳酸菌的分离鉴定及益生特性[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(2): 95-102.
LIN Long-zhen, ZOU Wei-ling, LI An-zhang, et al. Isolation, identification and probiotic characteristics of acid-producing and acid-resistant *Lactobacillus* strains[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(2): 95-102.
- [21] 熊强, 王凯, 王延斌. 植物乳杆菌的功能评价[J]. *生物加工过程*, 2016, 14(6): 46-53.
XIONG Qiang, WANG Kai, WANG Yan-bin. Gastrointestinal survival and beneficial properties in vitro of *Lactobacillus plantarum* strains[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2016, 14(6): 46-53.
- [22] 赵芳, 李艳琴, 李彬春. 模拟人体胃肠道环境筛选益生乳杆菌[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(6): 1 396-1 403.
ZHAO Fang, LI Yan-qin, LI Bin-chun. Screening of probiotic *Lactobacillus* in simulated gastrointestinal environment [J]. *Microbiology China*, 2016, 43(6): 1 396-1 403.
- [23] 张建新, 李梦, 郭祥瑞, 等. 产酸芽孢杆菌的筛选与生物学特性研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(5): 96-103.
ZHANG Jian-xin, LI Meng, GUO Xiang-rui, et al. Screening and biological characteristics of acid-producing bacillus[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science edition)*, 2021, 49(5): 96-103.
- [24] ABUSHELAIABI A, AL-MAHADIN S, EL-TARABILY K, et al. Characterization of potential probiotic lactic acid bacteria isolated from camel milk[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 79: 316-325.
- [25] ANGMO K, KUMARI A, SAVITR I, et al. Probiotic characterization of lactic acid bacteria isolated from fermented foods and beverage of Ladakh[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2016, 66: 428-435.
- [26] MIH A, MFRM A, MA A, et al. Inhibitory effects of probiotic potential lactic acid bacteria isolated from kimchi against *Listeria monocytogenes* biofilm on lettuce, stainless-steel surfaces, and MBEC™ biofilm device[J]. *LWT*, 2020, 118: 108864.