

低强度亚临界水提取水溶性芝麻蛋白与多肽

王瑞丹^{1,2}, 芦鑫^{1,2}, 孙强^{1,2}, 高锦鸿^{1,2}, 贾聪^{1,2}, 黄纪念^{1,2,3}

(1. 河南省农业科学院 农副产品加工研究中心, 郑州 450002; 2. 河南省农产品生物活性物质工程技术研究中心, 郑州 450002; 3. 农业部油料加工重点实验室, 武汉 430062)

摘要:以高温芝麻粕为原料,通过碱溶酸沉法提取芝麻蛋白,再利用低强度亚临界水提取芝麻蛋白中水溶性蛋白及多肽。通过单因素试验研究温度、pH、反应时间、液料比对水溶性蛋白及多肽得率的影响,再通过正交试验分别优化水溶性蛋白及多肽的提取工艺参数。结果表明:低强度亚临界水可显著提高水溶性蛋白及多肽的得率;低强度亚临界水提取水溶性蛋白的最优工艺参数为温度 125℃、pH 1.5、反应时间 30 min、液料比 30:1,在此条件下水溶性蛋白得率为 85.015%;亚临界水提取多肽的最优工艺参数为温度 125℃、pH 1.5、反应时间 60 min、液料比 50:1,在此条件下多肽得率为 40.537%。亚临界水提取率高,操作简便,为水溶性芝麻蛋白与多肽的提取提供参考依据。

关键词:高温芝麻粕;亚临界水;芝麻蛋白;多肽

中图分类号:TS229;TS201.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)06-0038-06

Extraction of water – soluble sesame protein and peptide by low strength subcritical water

WANG Ruidan^{1,2}, LU Xin^{1,2}, SUN Qiang^{1,2}, GAO Jinhong^{1,2}, JIA Cong^{1,2}, HUANG Jinian^{1,2,3}

(1. Research Center of Agricultural and Sideline Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Engineering Research Centre of Bioactive Substances in Agricultural Products, Zhengzhou 450002, China; 3. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

Abstract: High – temperature sesame meal was used as the raw material, and the sesame protein was obtained by alkali – soluble and acid – precipitation, then low strength subcritical water was used to extract water – soluble protein and peptide. The effects of temperature, pH, reaction time and ratio of liquid to material on the yields of water – soluble protein and peptide were studied by single factor experiment, and the extraction process parameters of water – soluble protein and peptide were optimized by orthogonal experiment. The result showed that the yield of water – soluble protein and peptide could be significantly improved by low – strength subcritical water. The optimal process parameters for low strength subcritical water extraction of water – soluble protein were as follows: temperature 125℃, pH 1.5, reaction time 30 min, ratio of liquid to material 30:1. Under the optimal conditions, the yield of water – soluble proteins was up to 85.015%. The optimal process parameters for subcritical water extraction of

peptide were as follows: hydrolysis temperature 125℃, pH 1.5, reaction time 60 min, ratio of liquid to material 50:1. Under the optimal conditions, the yield of peptide was up to 40.537%. The extraction rate of subcritical water was high, the operation was simple, and it provided a reference for the extraction of water – soluble sesame protein and peptide.

收稿日期:2020-08-04;修回日期:2021-03-31

基金项目:中原科技创新领军人才项目(194200510014);河南省科技攻关项目(202102110298);国家特色油料产业技术体系(CARS-14)

作者简介:王瑞丹(1994),女,研究实习员,硕士,研究方向为油料加工及副产物综合利用研究(E-mail)786901991@qq.com。

通信作者:黄纪念,研究员(E-mail)hjinian@sina.com。

Key words: high-temperature sesame meal; subcritical water; sesame protein; peptide

芝麻(*Sesamum indicum* L.), 又称胡麻、脂麻、乌麻、小胡麻, 是世界上重要的油料作物之一^[1-2]。芝麻含有丰富的蛋白质、油脂、糖类、维生素和矿物质等, 营养价值丰富, 同时具有重要的生物活性, 如降血压、抗氧化、抗菌、降低胆固醇等^[3-5]。《本草纲目》记载:“芝麻补五内, 益气力, 长肌肉, 填髓脑。”芝麻主要经高温烘烤生产芝麻油, 制油后会产生大量的芝麻粕, 芝麻粕中的蛋白质含量高, 且氨基酸种类丰富, 是一种具有开发利用价值的植物蛋白资源^[6-7]。然而, 经过高温处理后的芝麻粕中蛋白质发生严重变性, 限制其加工利用^[8]。因而有必要对高温芝麻粕中蛋白质进一步处理以进行深入开发。

近年来, 亚临界水以其环保、方便、无毒、低成本的优点在副产物深加工方面得到了广泛关注。亚临界水是温度在沸点(100℃)以上临界温度(374℃)以下仍保持为液体状态的水, 又称为高温水、超加热水等^[9-10]。利用亚临界水技术可提高蛋白质的溶解性, 且通过控制其反应参数(如时间和温度), 可以控制蛋白质向肽、游离氨基酸甚至有机酸的转化^[11-13]。这种灵活性在当前可用的其他水解技术(如酶解或化学水解)中是不存在的。

传统的亚临界水技术采用的温度在200℃以上, 能耗大。目前, 利用低强度亚临界水技术从高温芝麻粕中提取水溶性芝麻蛋白及多肽的研究鲜有报道。因此, 本研究以高温芝麻粕为原料, 采用碱溶酸沉法提取芝麻蛋白, 再利用低强度亚临界水提取芝麻蛋白中的水溶性芝麻蛋白和多肽, 通过单因素试验及正交试验分别优化水溶性芝麻蛋白及多肽的提取工艺, 从而提高高温芝麻粕中蛋白质的加工利用率, 为水溶性芝麻蛋白的功能特性研究及功能食品的开发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

高温芝麻粕, 实验室自制; 牛血清白蛋白, 美国Sigma公司; 二喹啉甲酸(BCA), Gen-view 科技有限公司; 其他试剂均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司。

K-05型自动定氮仪, 上海晟声自动化分析仪器有限公司; WHF-0.5型反应釜, 威海自控反应釜有限公司; Lyovac GT1 冷冻真空干燥机, 德国SRK系统技术有限公司; DL-5-B离心机, TGL-16A离心机, 上海安亭科学仪器厂; XS205电子天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; FE20实验室pH计,

上海梅特勒-托利多仪器有限公司; Infinite 200 Pro酶标仪, 奥地利Tecan公司; DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器, 巩义予华仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 高温芝麻粕的脱脂

将高温芝麻粕进行粉碎, 采用索氏抽提器进行脱脂, 获得脱脂高温芝麻粕, 于4℃储存备用。

1.2.2 脱脂高温芝麻粕成分测定

蛋白质含量的测定参照GB 5009.5—2010, 采用凯氏定氮法, 其中N换算系数为5.3; 粗脂肪含量的测定参照GB/T 14772—2008; 水分含量的测定参照GB 5512—1985; 灰分含量的测定参照GB/T 5505—2008; 总糖含量的测定采用差值法, 即总糖含量 = 100% - 蛋白质含量 - 粗脂肪含量 - 水分含量 - 灰分含量。

1.2.3 芝麻蛋白的提取

采用碱溶酸沉法提取芝麻蛋白。将脱脂高温芝麻粕与蒸馏水以料液比1:20的比例于室温搅拌均匀, 用5 mol/L NaOH调节pH为11.0, 搅拌60 min, 在4℃下以5 000 r/min离心20 min, 收集上清液并用5 mol/L HCl将pH调节至4.3, 5 000 r/min离心20 min, 收集沉淀, 冷冻干燥, 得芝麻蛋白, 于4℃储存备用。

1.2.4 低强度亚临界水提取水溶性蛋白及多肽

称取一定量芝麻蛋白, 按一定比例加入蒸馏水, 25℃磁力搅拌均匀, 用5 mol/L HCl/NaOH将混合液pH调节至一定值后, 转移入反应釜中加热到设定温度反应一定时间后, 以5 000 r/min离心20 min, 收集上清液并调节pH至7.0, 再次离心, 取上清液于4℃储存备用。对照组为未采用亚临界水处理(反应时间为0)。

1.2.5 水溶性蛋白得率测定

按1.2.4方法获得的上清液中蛋白质含量采用BCA法^[14]测定, 以牛血清白蛋白作为标准蛋白。BCA工作液由50 mL A液和1 mL B液现配而成, 其中:A液为5 g BCA、10 g无水碳酸钠、0.8 g酒石酸钠、2 g NaOH和4.75 g NaHCO₃溶于蒸馏水, 定容至500 mL, 调节pH至11.25; B液为2 g无水硫酸铜溶于蒸馏水并定容至50 mL。

标准曲线的绘制: 取牛血清白蛋白标准品适量配制成1 mg/mL的标准蛋白储备溶液, 再配制一系列蛋白质质量浓度梯度的标准蛋白溶液, 取1.0 mL标准蛋白溶液, 与2.0 mL BCA工作液混合, 于37℃下

水浴孵育 30 min, 在 562 nm 处测定吸光度, 以标准蛋白质量浓度(x)为横坐标、吸光度(y)为纵坐标绘制标准曲线, 建立的回归方程为 $y = 0.6374x + 0.0076$ ($R^2 = 0.9981$)。

样品的测定: 取 0.1 mL 样品溶液与 2.0 mL BCA 工作液混合, 混匀后于 37 °C 下水浴孵育 30 min, 在 562 nm 处测定吸光度, 根据标准曲线回归方程计算上清液中蛋白质含量。采用下式计算水溶性蛋白得率(Y_1)。

$$Y_1 = C_1 V_1 / m \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_1 为上清液中蛋白质含量, mg/mL; V_1 为上清液体积, mL; m 为原料芝麻蛋白中蛋白质的质量, mg。

1.2.6 多肽得率测定

参考芦鑫等^[15]的方法并稍作改进。取 1 mL 按 1.2.4 方法获得的上清液, 加入到 Amicon Ultra - 0.5 超滤离心管(截留相对分子质量为 10 kDa 滤芯)中, 以 4 000 r/min 离心 30 min, 重复超滤 3 次, 取透过液。采用 1.2.5 中 BCA 法测定透过液中蛋白质含量, 按下式计算多肽得率(Y_2)。

$$Y_2 = C_2 V_2 / m \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_2 为透过液中蛋白质含量, mg/mL; V_2 为透过液体积, mL; m 为原料芝麻蛋白中蛋白质的质量, mg。

1.2.7 数据处理与分析

所有试验均重复测定 3 次, 采用 SPSS 13.0 进行方差分析, 其中 $P < 0.01$ 表示差异极显著, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与分析

2.1 脱脂高温芝麻粕成分

经测定, 脱脂高温芝麻粕的蛋白质含量为 $(45.00 \pm 0.74)\%$, 粗脂肪含量为 $(2.54 \pm 0.03)\%$, 水分含量为 $(6.98 \pm 0.17)\%$, 灰分含量为 $(10.45 \pm 0.14)\%$, 总糖含量为 $(35.03 \pm 1.10)\%$ 。

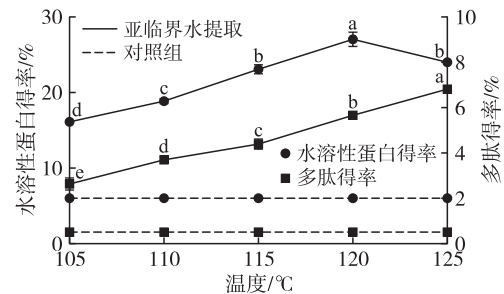
2.2 亚临界水提取水溶性蛋白及多肽单因素试验

2.2.1 温度对水溶性蛋白及多肽得率的影响

固定 pH 为 3.0, 反应时间为 40 min, 液料比为 40:1, 考察不同亚临界水温度对水溶性蛋白及多肽得率的影响, 结果见图 1。

由图 1 可知: 采用亚临界水提取的水溶性蛋白与多肽得率明显高于对照组, 随着亚临界水温度的升高, 水溶性蛋白得率逐渐升高随后又下降, 当温度为 120 °C 时, 水溶性蛋白得率最大, 为 $(27.04 \pm 1.34)\%$, 当温度继续上升至 125 °C 时水溶性蛋白得率下降为 $(24.02 \pm 0.40)\%$ 。这是由于高温改变了

亚临界水的性质, 水的电离常数增加, 其性质随着温度的升高由极性变为非极性, 促进了极性较小的化合物在水中的溶解^[16], 但温度过高, 蛋白质发生部分聚集造成水溶性蛋白得率下降。Zhang 等^[17]研究发现, 亚临界水温度升高至 120 °C 时, 蛋白质粒径减小, 溶解度显著增加, 当温度达到 160 °C 时, 蛋白质开始聚集, 溶解度下降, 随着温度的进一步升高, 其诱导蛋白质降解成多肽、氨基酸。Zahng 等^[18]等也报道了类似的结果, 即在 110 °C 时玉米醇溶蛋白的溶解性显著升高, 随后蛋白质发生聚集, 溶解性开始下降。由图 1 可知, 亚临界水提取的多肽得率在设定温度范围内随着温度的上升呈逐渐上升的趋势, 在 125 °C 时达到 $(6.82 \pm 0.17)\%$ 。因此, 提取水溶性蛋白宜选择温度为 120 °C, 提取多肽宜选择温度为 125 °C。



注: 图中不同字母表示同曲线不同点间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

图 1 亚临界水温度对水溶性蛋白及多肽得率的影响

2.2.2 pH 对水溶性蛋白及多肽得率的影响

固定温度为 120 °C (提取水溶性蛋白) 或 125 °C (提取多肽), 反应时间为 40 min, 液料比为 40:1, 考察不同 pH 对水溶性蛋白及多肽得率的影响, 结果见图 2。

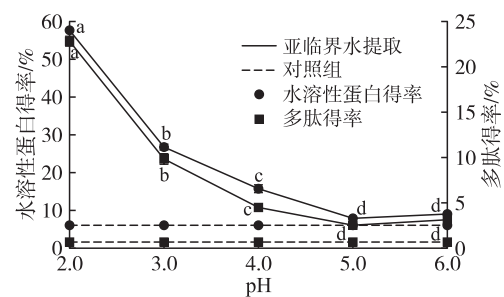


图 2 pH 对水溶性蛋白及多肽得率的影响

由图 2 可知, 随着 pH 从 2.0 增加到 6.0, 亚临界水提取的水溶性蛋白与多肽得率呈逐渐下降的趋势。在 pH 为 2.0 时, 水溶性蛋白与多肽的得率均为最大值, 且均明显高于对照组。这可能是在此 pH 条件下, 酸催化提高了蛋白质的溶解性, 水溶性蛋白浓度增大, 同时肽键断裂速度加快, 在该条件下多肽

浓度也表现为最高,因而二者得率最高。因此,选择体系的pH为2较为合适。

2.2.3 反应时间对水溶性蛋白及多肽得率的影响

固定pH为2.0,温度为120℃(提取水溶性蛋白)或125℃(提取多肽),液料比为40:1,考察不同反应时间对水溶性蛋白及多肽得率的影响,结果见图3。

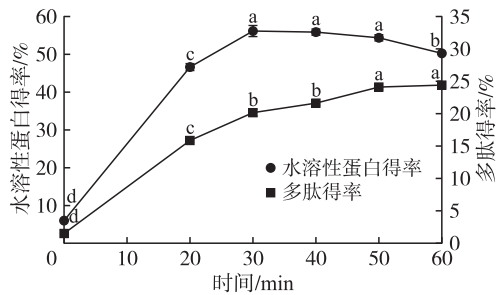


图3 反应时间对亚临界水提取的水溶性蛋白及多肽得率的影响

由图3可知,反应时间在0~30 min时,水溶性蛋白得率不断增大,在30 min时达到最大值,为(56.46 ± 1.97)%。当反应时间超过30 min时,蛋白质水解程度提高,部分蛋白质转化为多肽,从而造成蛋白质浓度下降,水溶性蛋白得率开始下降。反应时间在0~50 min时,多肽得率不断增大,在50 min时达到最大值。当反应时间超过50 min时,多肽得率受反应时间影响不显著,这可能是多肽生成速率与分解速率达到平衡的结果。此结果与芦鑫等^[19]的研究结果一致。因此,提取水溶性蛋白宜选取反应时间为30 min,提取多肽宜选取反应时间为50 min。

2.2.4 液料比对水溶性蛋白及多肽得率的影响

固定pH为2.0,温度为120℃(提取水溶性蛋白)或125℃(提取多肽),反应时间为30 min(提取水溶性蛋白)或50 min(提取多肽),考察不同液料比对水溶性蛋白及多肽得率的影响,结果见图4。

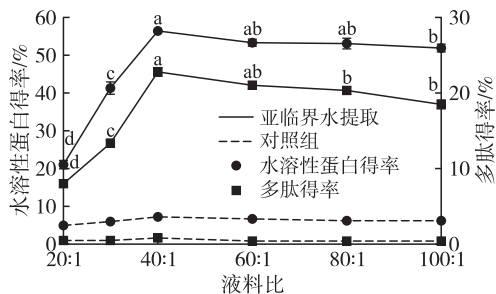


图4 液料比对水溶性蛋白及多肽得率的影响

由图4可知,与对照组相比,亚临界水提取的水溶性蛋白及多肽得率明显增大。亚临界水提取时,随液料比的增加,水溶性蛋白及多肽得率逐渐增大,

这是因为随着液料比的增加,溶液黏度随之减小,更多的水渗透到物料中,水与目标成分的接触面积增加,从而使目标成分更充分地被提取^[20]。在液料比为40:1时,亚临界水提取的水溶性蛋白及多肽得率均达到最大值,分别为(56.56 ± 0.63)%和(22.85 ± 0.76)%;而当液料比继续增大时,二者均有所降低,且易造成溶剂的浪费,不利于后续试验的开展。因此,选取液料比40:1较为合适。

2.3 亚临界水提取水溶性蛋白的正交试验

在单因素试验基础上,固定反应时间为30 min,对pH、液料比与温度进行 $L_9(3^4)$ 正交试验设计,以获得最优的水溶性蛋白提取工艺参数。表1为亚临界水提取水溶性蛋白的正交试验设计及结果,表2为亚临界水提取水溶性蛋白正交试验的方差分析。

表1 亚临界水提取水溶性蛋白的正交试验设计及结果

试验号	A pH	B 液料比	C 温度	水溶性蛋白得率/%
1	1(1.5)	1(30:1)	1(115℃)	70.115
2	1	2(40:1)	2(120℃)	75.739
3	1	3(50:1)	3(125℃)	90.166
4	2(2.0)	1	2	35.829
5	2	2	3	49.144
6	2	3	1	34.695
7	3(2.5)	1	3	42.239
8	3	2	1	39.161
9	3	3	2	30.204
k_1	78.674	49.395	47.990	
k_2	39.889	54.681	47.257	
k_3	37.201	51.688	60.516	
R	41.473	5.286	13.259	

表2 亚临界水提取水溶性蛋白正交试验的方差分析

因素	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 659.91	6	609.98	46.85	0.021 0
A	3 012.96	2	1 506.48	115.71	0.008 6
B	119.59	2	59.79	4.59	0.178 8
C	527.36	2	263.68	20.25	0.047 1
误差	26.04	2	13.02		

由表1可知,各因素对水溶性蛋白得率影响的主次顺序为pH(A) > 温度(C) > 液料比(B),最优组合为 $A_1B_2C_3$ 。由表2可知,正交模型显著($P < 0.05$),可以客观真实地反映pH、液料比、温度对水溶性蛋白得率的影响规律。其中,pH是极显著因素,温度是显著因素,而液料比影响不显著。因此,从经济角度考虑,选择最优水平组合为 $A_1B_1C_3$,即pH为1.5,液料比为30:1,温度为125℃。在最优工艺条件下进行3次重复验证性试验,得到水溶性

蛋白得率为 85.015%。

2.4 亚临界水提取多肽的正交试验

在单因素试验基础上,固定亚临界水温度为 125℃,对 pH、液料比与反应时间进行 $L_9(3^4)$ 正交试验设计,以获得最优的多肽提取工艺参数。表 3 为亚临界水提取多肽的正交试验设计及结果,表 4 为亚临界水提取多肽正交试验的方差分析。

表 3 亚临界水提取多肽的正交试验设计及结果

试验号	A pH	B 液料比	C 反应时间	多肽得率/%
1	1(1.5)	1(30:1)	1(40 min)	20.173
2	1	2(40:1)	2(50 min)	34.928
3	1	3(50:1)	3(60 min)	40.537
4	2(2.0)	1	2	17.216
5	2	2	3	22.230
6	2	3	1	21.450
7	3(2.5)	1	3	19.590
8	3	2	1	14.216
9	3	3	2	29.514
k_1	31.879	18.993	18.613	
k_2	20.299	23.791	27.219	
k_3	21.107	30.500	27.452	
R	11.580	11.507	8.839	

表 4 亚临界水提取多肽正交试验的方差分析

因素	平方和	自由度	均方	F	P
模型	603.51	6	100.58	55.84	0.017 7
A	250.80	2	125.40	69.61	0.014 2
B	200.45	2	100.23	55.64	0.017 7
C	152.25	2	76.12	42.26	0.023 1
误差	3.60	2	1.80		

由表 3 可看出,各因素对多肽得率影响的主次顺序为 pH(A) > 液料比(B) > 反应时间(C)。由表 4 可看出,正交模型显著,可以客观真实地反映 pH、液料比、反应时间对多肽得率的影响规律。其中, pH 是第一显著因素,其次是液料比,最后是反应时间。最优水平组合为 $A_1B_3C_3$,即 pH 为 1.5,液料比为 50:1,反应时间为 60 min。在最优工艺条件下进行 3 次重复验证性试验,得到多肽得率为 40.537%。

3 结论

本研究对影响水溶性芝麻蛋白与多肽得率的亚临界水温度、pH、反应时间及液料比进行了单因素试验优化,在此基础上分别进行了正交试验优化。结果表明:低强度亚临界水可以用于提取水溶性芝麻蛋白及多肽;亚临界水提取水溶性芝麻蛋白的最优工艺参数为亚临界水温度 125℃、pH 1.5、反应时间 30 min、液料比 30:1,在最优工艺条件下水溶性芝麻蛋白得率为 85.015%;亚临界水提取多肽的最

优工艺参数为亚临界水温度 125℃、pH 1.5、反应时间 60 min、液料比 50:1,在最优工艺条件下多肽得率为 40.537%。在此研究基础上,后续将对水溶性芝麻蛋白的功能特性、多肽活性进一步研究,从而为高温芝麻粕中蛋白质的高值化利用提供理论参考与数据支持。

参考文献:

- [1] 李娜. 芝麻的营养成分与食疗保健作用[J]. 中国食物与营养,2008(5):55-57.
- [2] 袁东振. 亚临界水提取芝麻粕中蛋白及制备 ACE 抑制肽的研究[D]. 郑州:河南工业大学,2015.
- [3] WANG R D, LU X, SUN Q, et al. Novel ACE inhibitory peptides derived from simulated gastrointestinal digestion in vitro of sesame (*Sesamum indicum* L.) protein and molecular docking study[J/OL]. Int J Mol Sci, 2020, 21(3): 1059 [2020-08-04]. <https://doi.org/10.3390/ijms21031059>.
- [4] LU X, ZHANG L X, SUN Q, et al. Extraction, identification and structure-activity relationship of antioxidant peptides from sesame (*Sesamum indicum* L.) protein hydrolysate[J]. Food Res Int, 2019, 116: 707-716.
- [5] AL-BACHIR M. Some microbial, chemical and sensorial properties of gamma irradiated sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds[J]. Food Chem, 2016, 197: 191-197.
- [6] 戚聿妍. 亚临界水提取芝麻粕中酚类化合物及水解芝麻蛋白的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [7] 文芬,张森,邵雪梅,等. 芝麻饼粕中蛋白质的提取及其应用研究现状[J]. 食品研究与开发,2018,39(14): 220-224.
- [8] 王瑞萍. 高温芝麻饼粕蛋白的制备及其结构和功能性质的研究[D]. 郑州:河南农业大学,2013.
- [9] ZHANG Y, TAHA A A, YING Y, et al. Subcritical, water extraction of bioactive components from ginseng roots (*Panax ginseng* C. A. Mey)[J]. Ind Crop Prod, 2018, 117: 118-127.
- [10] ERSAN S, RUCULU USTUNDAG O, CARLE R, et al. Subcritical water extraction of phenolic and antioxidant constituents from pistachio (*Pistacia vera* L.) hulls[J]. Food Chem, 2018, 253: 46-54.
- [11] ROGALINSKI T, HERRMANN S, BRUNNER G. Production of amino acids from bovine serum albumin by continuous subcritical water hydrolysis[J]. J Supercrit Fluids, 2005, 36: 49-58.
- [12] SUNPHORKA S, CHAVASIRI W, OSHIMA Y, et al. Kinetic studies on rice bran protein hydrolysis in subcritical water[J]. J Supercrit Fluids, 2012, 65: 54-60.

(下转第 58 页)

- 105968 [2020 - 09 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105968>.
- [2] LIU X, GUO J, WAN Z. Wheat gluten - stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers[J]. Food Hydrocoll, 2018, 77: 168 - 175.
- [3] WIJAYA W, MEEREN P, DEWETTINCK K. High internal phase emulsion (HIPE) - templated biopolymeric oleofilms containing an ultra - high concentration of edible liquid oil[J]. Food Funct, 2018, 9: 1993 - 1997.
- [4] JIAO B, SHI A, WANG Q, et al. High - internal - phase Pickering emulsions stabilized solely by peanut - protein - isolate microgel particles with multiple potential applications[J]. Angew Chem Int Ed, 2018, 57 (30): 9274 - 9278.
- [5] LIM H, KASSIM A, HUANG N. Three - component olive oil - in - water high internal phase emulsions stabilized by palm surfactant and their moisturizing properties [J]. J Disper Sci Technol, 2009, 31(1): 95 - 101.
- [6] PARK C, CHO W, LEE S. Emulsion stability of cosmetic creams based on water - in - oil high internal phase emulsions[J]. Korea - Australia Rheol J, 2003, 15: 125 - 130.
- [7] XU Y, TANG C, LIU T. Ovalbumin as an outstanding Pickering nanostabilizer for high internal phase emulsions [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(33): 8795 - 8804.
- [8] WANG A, PATERSON T, OWEN R. Photocurable high internal phase emulsions (HIPEs) containing hydroxyapatite for additive manufacture of tissue engineering scaffolds with multi - scale porosity[J]. M Sci Eng C Mater Bioppl, 2016, 67: 51 - 58.
- [9] CALDERÓ G, LLINÁS M, GARCÍA - CELMA M. Studies on controlled release of hydrophilic drugs from W/O high internal phase ratio emulsions[J]. J Pharm Sci, 2010, 99(2): 701 - 711.
- [10] ZHOU F, ZENG T, YIN S. Development of antioxidant gliadin particle stabilized Pickering high internal phase emulsions (HIPEs) as oral delivery systems and the in vitro digest fate[J]. Food Funct, 2018, 9(2): 959 - 970.
- [11] IKEM V, MENNER A, BISMARCK A. High internal phase emulsions stabilized solely by functionalized silica particles[J]. Angew Chem Int Ed, 2008, 47(43): 8277 - 8279.
- [12] WILLIAMS J. High internal phase water - in - oil emulsions: influence of surfactants and cosurfactants on emulsion stability and foam quality[J]. Langmuir, 1991, 7(7): 1370 - 1377.
- [13] ZOU S, YANG Y, LIU H. Synergistic stabilization and tunable structures of Pickering high internal phase emulsions by nanoparticles and surfactants [J]. Colloid Surface A, 2013, 436: 1 - 9.
- [14] CHASSAING B, KOREN O, GOODRICH J. Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome [J]. Nature, 2015, 519: 92 - 96.
- [15] 刘广宇, 孙永强, 李秋小. 椰子油脂乙氧基化物的合成[J]. 日用化学工业, 2007(6): 29 - 32.
- [16] POWELL K, DAMITZ R, CHAUHAN A. Relating emulsion stability to interfacial properties for pharmaceutical emulsions stabilized by Pluronic F68 surfactant[J]. Int J Pharm, 2017, 521(1/2): 8 - 18.
- [17] 赵国玺, 朱瑶. 表面活性剂作用原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 1 - 10.
- [18] ZHANG Q T, TU Z C, WANG H, et al. Functional properties and structure changes of soy bean protein isolate after subcritical water treatment[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(6): 3412 - 3421.
- [19] 芦鑫, 孙强, 张丽霞, 等. 亚临界水水解脱脂高温芝麻饼粕中蛋白与糖类研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 66 - 72.
- [20] 颜征. 莲房多酚的亚临界水萃取、组成及活性评价[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2019.
- [13] SEREEWATTHANAWUTA I, PRAPINTIPA S, WATCHIRARUJI K, et al. Extraction of protein and amino acids from deoiled rice bran by subcritical water hydrolysis [J]. Bioresour Technol, 2008, 99(3): 555 - 561.
- [14] 韩富亮, 袁春龙, 郭安鹊, 等. 二喹啉甲酸(BCA)法分析蛋白多肽的原理、影响因素和优点[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(11): 202 - 207.
- [15] 芦鑫, 胡东彬, 贾聪, 等. 体外模拟消化芝麻蛋白产生多肽的抗氧化性分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 63 - 66, 81.
- [16] BUDRAT P, SHOTIPRUK A. Enhanced recovery of phenolic compounds from bitter melon (*Momordica charantia*) by subcritical water extraction[J]. Sep Purif Technol, 2009, 66(1): 125 - 129.

(上接第 42 页)