

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.01.028

铁观音茶渣蛋白水解物挤压膨化辅助碱酶复合提取工艺优化及其功能特性

Extrusion assisted alkaline-enzyme extraction process optimization of protein hydrolysate from Tie Guanyin tea residue and its functionalities

郭凤仙¹ 郑宗平¹ 黄程芳¹ 赵薇¹ 姚远²

GUO Feng-xian¹ ZHENG Zong-ping¹ HUANG Cheng-fang¹ ZHAO Wei¹ YAO Yuan²

(1. 泉州师范学院, 泉州 福建 362000; 2. 浙江五芳斋实业股份有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

(1. Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China;

2. Zhejiang Wufangzhai Industrial Co., Ltd., Jiaying, Zhejiang 314000, China)

摘要:以铁观音茶渣为研究对象,通过单因素及响应面法探讨了挤压膨化的物料含水量、套筒温度及螺杆频率对其辅助碱酶复合法提取茶渣蛋白水解物(TPH)效果的影响,并对TPH功能特性进行了研究。结果表明,TPH最佳挤压膨化辅助提取工艺条件为:物料含水量15%,套筒温度97℃,螺杆频率40 Hz,此条件下提取率提高到(71.37±0.09)%,与预测值接近。蛋白水解物清除DPPH·和ABTS⁺·的IC₅₀值分别为23.4,111.4 μg/mL,较直接提取的分别下降了18%,32%;除乳化稳定性有所下降外,溶解性和乳化性及起泡特性均得到显著提高(P<0.05)。说明挤压膨化辅助提取可以较好地改善TPH的功能特性,提升其在食品中的应用价值与潜力。

关键词:铁观音;茶渣;蛋白水解物;挤压膨化;抗氧化性;乳化特性;起泡特性

Abstract: Taking Tie Guanyin residues as the research object, through single factor experiment and response surface methodology, the effects of extrusion water content, sleeve temperature and screw frequency on its assisted alkaline-enzyme combined extraction of tea residue protein hydrolysates (TPH) were discussed, and the functionalities of TPH was then investigated. The optimal extrusion assisted extractions were water content of tea residue material 15%, sleeve temperature 97℃, screw frequency 40 Hz. Under the conditions the extraction rate of TPH

was improved to (71.37±0.09)%, which was close to the predicted result. The results of TPH antioxidant activity showed the IC₅₀ values of DPPH· and ABTS⁺· were 23.4 μg/mL and 111.4 μg/mL, respectively, which were 18% and 32% lower than those of directly extracted sample; and except the decrease of emulsion stability, the solubility, emulsifying activity index and foaming properties of TPH were all significantly improved (P<0.05). The results indicated that the extrusion assisted extraction process could well improve the functionalities of TPH, which makes its application in food system valuable and possible.

Keywords: Tie Guanyin; tea residues; protein hydrolysate; extrusion; antioxidant activities; emulsifying properties; foaming properties

中国茶叶资源丰富,在茶叶加工及相关产品生产过程中会产生大量的茶渣废料,约占成品茶量的10%^[1],这些茶渣废料大多被作为肥料或饲料^[2-3],附加值低,且造成资源浪费。为解决上述问题,目前已有学者将茶渣废料作为吸附剂^[4]应用于水处理及印染行业,制备高分子材料应用于化工等产业,加工成建筑材料^[5]应用于建筑行业。茶渣中含有15%~30%(干基)的蛋白质,且氨基酸组成与大豆蛋白非常相似,具有较高的营养价值^[6]。

为提升茶渣蛋白的氧化及功能特性,目前已报道的改性方法包括酶法^[7-8]、糖基化^[9]及挤压膨化法^[10]。有研究^[11-12]表明,茶渣蛋白的提取方法中碱酶复合法优于传统的碱法和酶法,且所得蛋白经过初步酶改性。基于此,试验进一步研究挤压膨化辅助碱酶法提取的双重改性对茶渣蛋白水解物的改性作用。目前,有关挤压膨化辅助提取对茶蛋白功能影响研究较为有限。谢蓝华等^[10]报道挤压膨化辅助碱酶法提取可以改善乌龙茶单枞茶叶蛋

基金项目:福建省中青年教育科研项目(编号:JAT160405);泉州市“港湾计划”引进高层次人才团队项目(编号:2018CT004);泉州师范学院大学生创新创业训练计划项目(编号:201710399125)

作者简介:郭凤仙,女,泉州师范学院讲师,博士。

通信作者:郑宗平(1976—),男,泉州师范学院教授,博士。

E-mail: zzpsea@qztc.edu.cn

收稿日期:2020-06-23

白功能特性及抗氧化性;黄梦姣等^[13]报道挤压膨化预处理可以提高茶叶中水溶性物质溶出率。然而,茶叶品种不同,所含蛋白质结构及功能也有所不同,如 Ren 等^[14]研究发现绿茶蛋白二级结构中无规卷曲比例远高于红茶及乌龙茶,同时绿茶蛋白泡沫稳定性和乳化活性也要高于乌龙茶和红茶。因此,相同的改性方法应用于不同种类的茶,对所提取蛋白的改性效果很可能因茶叶品种、发酵程度及所含蛋白结构而异,如挤压膨化预处理的乌龙茶水溶性提高了 86.21%,而绿茶只提高 7.41%^[13]。目前,挤压膨化技术复合酶法对半发酵及发酵茶茶蛋白的改性研究还未见报道。试验拟以半发酵茶铁观音茶渣为原料,研究挤压膨化预处理对碱酶法提取的茶渣蛋白的功能特性及抗氧化活性的改性作用,以期对铁观音茶叶乃至其他半发酵茶加工副产物的高值化应用提供技术参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

铁观音加工过程中产生的茶渣:福建安溪铁观音集团股份有限公司;

玉米油:嘉里粮油(中国)有限公司;

透析袋:截留分子量 500 Da,美国 Viskase 公司;

碱性蛋白酶:2.4 AU/mL,诺维信(中国)生物技术有限公司;

1,1-二苯基-2-苦肼基(DPPH)、2'-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS):纯度 $\geq 97\%$ (HPLC),美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 仪器与设备

高速万能粉碎机:FW-100 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

酸度计:PB-21 型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-4A 型,国华电器有限公司;

电动搅拌机:R30A 型,上海弗鲁克科技发展有限公司;

自动凯氏定氮仪:K9840 型,济南海能仪器股份有限公司;

高速冷冻离心机:GL-20G 型,上海安亭科学仪器厂;

冷冻干燥机:FD-1A-80 型,北京博医康实验仪器有限公司;

膨化食品机:DS32II 试验机型,山东赛信膨化机械有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-1200 型,上海美谱达仪器有限公司;

高速分散器:T18D S25 数显型,德国 IKA 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 铁观音茶渣经 45 °C 烘箱干燥 2 h

后,粉碎过 80 目筛。取一定量茶渣粉,用去离子水调整水分含量后放入挤压膨化机的进料口,控制一定的螺杆电机控制频率及挤压端温度进行挤压膨化处理,处理后的茶渣经初步研碎后,45 °C 干燥至恒重,粉碎过 80 目筛备用。

1.3.2 茶渣蛋白水解物(TPH)提取

(1) 碱酶提取:经挤压膨化预处理的茶渣采用碱酶复合法提取茶渣蛋白水解物。按 $m_{\text{茶渣}} : m_{\text{水}} = 1 : 35$ 的料液比加入蒸馏水,用 2 mol/L NaOH 溶液调节至 pH 10,加入体积分数 2.5% 的液体碱性蛋白酶(21 450 U),60 °C 下搅拌浸提 2 h,提取过程中用 1 mol/L NaOH 严格控制在 pH 10 保持恒定,提取结束后于 100 °C 水浴中灭酶 10 min,冰浴冷却至室温后离心(7 000 r/min,20 min),所得上清液为 TPH 粗提液^[11,15]。采用凯氏定氮法测定茶渣及 TPH 提取液中蛋白质含量,蛋白提取率为上清液中蛋白的总含量与茶渣中总蛋白含量的百分比^[12]。

(2) 初步分离:在提取液中缓慢加入硫酸铵,使硫酸铵最终达到 100% 饱和度,继续搅拌 10~20 min,置于 4 °C 冰箱中过夜后,离心(3 000 r/min,30 min),收集蛋白质沉淀。将含硫酸铵的蛋白质沉淀复溶后装在透析袋中,置 4 °C 冰箱内透析 12 h,期间每隔 4 h 换一次透析缓冲液,直到用氯化钡溶液检查透析液无白色沉淀后,结束透析。将透析袋中溶液冷冻、冻干后得到茶渣蛋白水解物样品,供后续测试使用。

1.3.3 挤压膨化预处理工艺优化

(1) 单因素试验:基本工艺条件为物料含水量 16%,套筒温度 100 °C,螺杆频率为 20 Hz,在此条件下以茶渣蛋白水解提取率为考察指标,控制单一变量,选取物料含水量为 4%,8%,12%,16%,20%,套筒温度为 60,80,100,120,140 °C,螺杆频率为 10,20,30,40,50 Hz,进行单因素试验。

(2) 响应面试验设计:在单因素试验的基础上,应用响应面分析软件 Design-Expert 10.0.7 中 Box-Behnken 中心组合试验原理,构建三因素三水平的模型,对试验数据进行进一步优化,最终确定出最佳挤压膨化预处理工艺。

1.3.4 抗氧化性的测定

(1) DPPH·清除力:参照文献^[16]。

(2) ABTS⁺·清除力:参照文献^[17]。

1.3.5 功能特性的测定

(1) 溶解性:参照文献^[18]。

(2) 乳化活性:参照文献^[14]。

(3) 起泡性:参照文献^[19]。

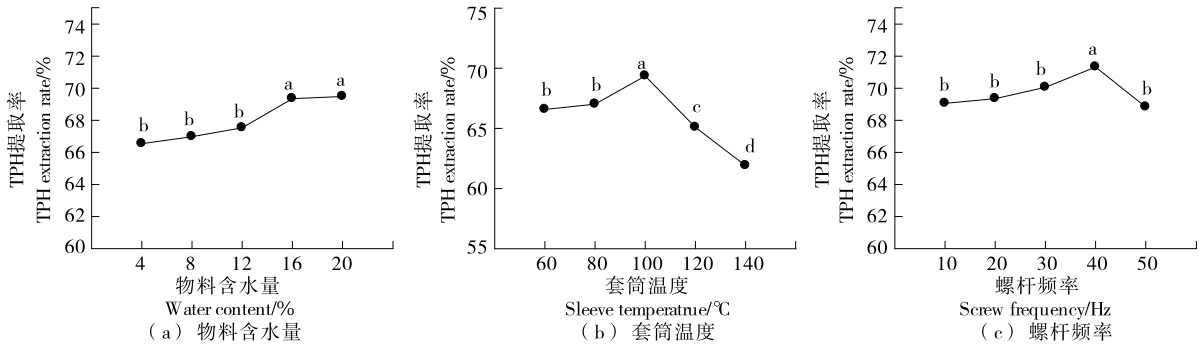
1.3.6 数据统计分析 所有试验重复 3 次,SPSS Statistics 22.0 进行数据分析,采用 LSD 测试进行数据中的显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著;采用 sigmPlot 10.0 绘图;采用 Probit 进行 IC_{50} 分析。

2 结果与分析

2.1 挤压膨化预处理条件优化

2.1.1 单因素试验 如图 1(a)所示,TPH 提取率随物料水分含量的增加而升高,当物料含水量达到 16%时,TPH 提取率显著增加($P < 0.05$),继续增加物料含水量,其提取率无显著性变化。这可能是因为物料含水量较低时,挤压出料时物料没有足够的水蒸气,达不到膨化效果^[20],当含水量达到一定值时,物料会得到较好的膨化效果,使得茶渣蛋白发生适当变性,从而有利于 TPH 的分离提取。因此,选择最佳物料含水量为 16%。如图 1(b)所示,当套筒温度升高到 100 °C 时,TPH 提取率显著升高($P <$

0.05),之后其提取率显著下降($P < 0.05$),可能是高温下进行挤压膨化会破坏蛋白的结构,有利于促进蛋白质水解,但温度过高会导致蛋白分子间发生紧密聚集,不利于其水解溶出^[21]。因此,选择最佳套筒温度为 100 °C。挤压膨化的转速主要通过螺杆电机控制频率来调节,由图 1(c)可知,螺杆电机控制频率增大到 40 Hz 时,TPH 提取率显著升高($P < 0.05$),继续增大频率,其提取率下降,可能是因为螺杆频率过小,物料受到膨化效果不明显,而螺杆频率过大,又会导致物料在挤压机内停留时间短,剪切作用时间短,蛋白质的变性程度低,从而不利于蛋白的分离提取^[22]。因此选择最佳螺杆频率为 40 Hz。



小写字母不同表示不同样品的差异显著($P < 0.05$)

图 1 物料含水量、套筒温度和螺杆频率对铁观音茶渣蛋白水解物(TPH)提取率的影响

Figure 1 Effect of water content, sleeve temperature and screw frequency on the extraction rate of Tie Guanyin tea residue protein hydrolytes (TPH)

2.1.2 响应面分析 根据单因素试验结果,选取物料含水量、套筒温度、螺杆频率 3 个因素的水平取值见表 1,试验方案与结果见表 2。

通过 Design-expert 10.0.7 软件对结果进行拟合回归,得方程为:

$$R = -10.785 + 1.377\ 94A + 1.029\ 25B + 1.071\ 17C - 0.001\ 031\ 25AB + 0.012\ 5AC - 0.000\ 862\ 5BC - 0.058\ 656A^2 - 0.004\ 04B^2 - 0.014\ 435C^2 \quad (1)$$

如表 3 所示,二次回归方程模型 $P < 0.001$,失拟项 $P > 0.05$,说明该模型误差较小,拟合度好,可以用于茶渣的挤压膨化预处理工艺分析和预测;模型决定系数 $R^2 = 0.971\ 5$,调整系数 $R^2_{Adj} = 0.934\ 8$,进一步表明该模型拟合度较好。根据各因素 F 值判断,挤压膨化预处理中影响 TPH 提取率的因素依次为 $B > A > C$,交互项的影响依为

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of response surface methodology experiment

水平	A 物料含水量/%	B 套筒温度/°C	C 螺杆频率/Hz
-1	12	80	30
0	16	100	40
1	20	120	50

表 2 响应面试验结果

Table 2 Results of response surface methodology experiment

试验号	A	B	C	提取率/%
1	0	0	0	71.97
2	0	1	-1	67.15
3	1	1	0	67.54
4	0	-1	-1	68.02
5	-1	-1	0	69.23
6	0	0	0	71.03
7	-1	1	0	68.23
8	-1	0	1	69.32
9	0	0	0	70.92
10	1	0	-1	67.67
11	0	-1	1	69.12
12	1	-1	0	68.87
13	1	0	1	69.21
14	0	0	0	71.87
15	0	1	1	67.56
16	0	0	0	71.32
17	-1	0	-1	69.87

表 3 回归模型方差分析[†]

Table 3 ANOVA for response surface quadratic model

差来源	自由度	平方和	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	38.71	9	4.30	26.50	0.000 1	** *
A	1.34	1	1.34	8.24	0.024 0	*
B	2.83	1	2.83	17.45	0.004 1	** *
C	0.73	1	0.73	4.47	0.072 2	
AB	0.03	1	0.03	0.17	0.694 3	
AC	1.00	1	1.00	6.16	0.042 1	*
BC	0.12	1	0.12	0.73	0.420 1	
A ²	3.71	1	3.71	22.85	0.002 0	** *
B ²	17.11	1	17.11	105.45	<0.000 1	** *
C ²	8.77	1	8.77	54.06	0.000 2	** *
残差	1.14	7	0.16			
失拟项	0.22	3	0.07	0.32	0.813 0	
纯误差	0.92	4	0.23			
总差	39.84	16				

[†] * 表示 P<0.05, ** 示 P<0.01; R² = 0.971 5, R_{adj}² = 0.934 8。

AC>BC>AB,其中,B对响应值的影响最显著。

由图 2 可知,物料含水量和螺杆频率交互的 3D 曲面倾斜度和等高线宽度最大,说明物料含水量和螺杆频率对 TPH 提取率的影响最显著(P<0.05),而物料含水量和套筒温度、套筒温度和螺杆频率的曲面倾斜度和等高线弧度较为接近,曲线宽度较窄,对 TPH 提取率影响不显著(P>0.05),此结果与模型回归分析结果(表 3)相一致。

据此优化所得最佳工艺条件为物料含水量 15.2%,套筒温度 97.1℃,螺杆频率 40.8 Hz,在此条件下 TPH 提取率预测值为 71.52%。考虑到实际操作的便利,确定挤压膨化预处理工艺条件为物料含水量 15%,套筒温度 97℃,螺杆频率 40 Hz,实际测得平均值为(71.37±0.09)%,与理论值非常接近且优于表 2 中的所有试验组,说明该方程与实际情况拟合较好,充分验证了所建模型的正确性。同时,直接碱酶法的 TPH 提取率为(69.00±0.52)%,采用经优化的挤压膨化辅助碱酶法提取率要显著高于前者(P<0.05)。

2.2 挤压膨化预处理对 TPH 功能特性的影响

2.2.1 抗氧化活性 如图 3 所示,在受试浓度范围内,

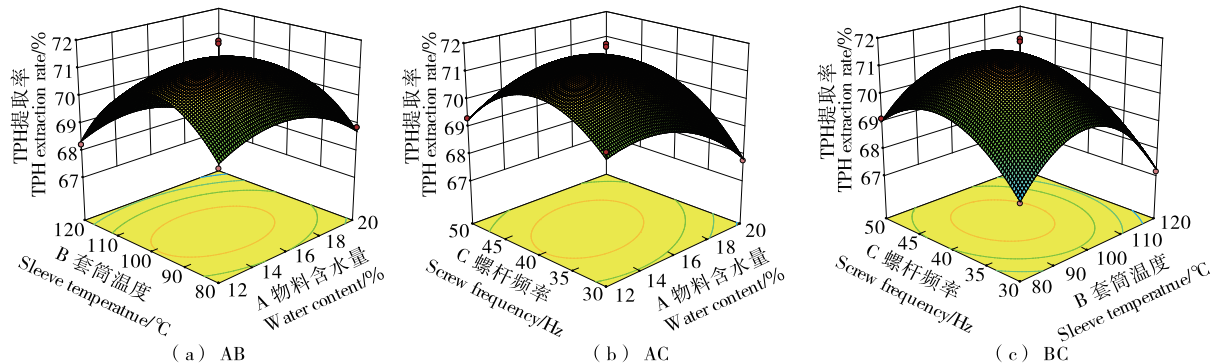
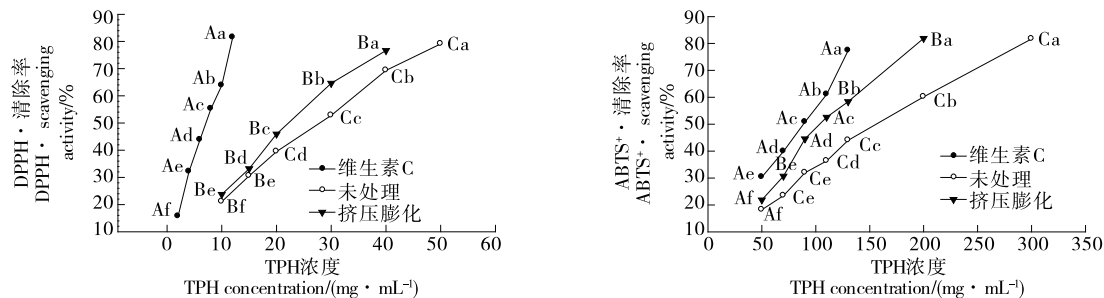


图 2 两因子交互作用对铁观音茶渣蛋白水解物(TPH)提取率的响应面图

Figure 2 Response surface and contour plots for the effect of cross interactions among the factors on the extraction rate of Tie Guanyin tea residue protein hydrolytes (TPH)



维生素C、未处理以及挤压膨化的 IC₅₀ 分别为 7.2, 28.3, 23.4 mg/mL 维生素C、未处理以及挤压膨化的 IC₅₀ 分别为 85.5, 164.0, 111.4 mg/mL

大写字母不同表示同一样品在不同浓度下的差异显著(P<0.05);小写字母不同表示相同浓度下不同样品的差异显著(P<0.05)

图 3 挤压膨化预处理对茶渣蛋白水解物(TPH) DPPH·清除率和 ABTS⁺·清除率的影响

Figure 3 Effect of extrusion pretreatment on the DPPH·scavenging activity and ABTS⁺·scavenging activity of Tie Guanyin residue protein hydrolytes (TPH)

TPH的DPPH·清除率和ABTS⁺·清除率均随浓度的增加逐渐增大,呈浓度依赖性。当TPH浓度分别大于20, 90 μg/mL时,经挤压膨化预处理样品的DPPH·清除率及ABTS⁺·清除率显著高于未处理的(P<0.05),且前者相较于后者IC₅₀值分别下降了17.3%,32.1%,两种自由基清除能力虽低于维生素C,但高于李永富^[23]及杨旭等^[24]报道的茶蛋白。这可能是茶渣原料及提取工艺不同造成的;也可能是由于挤压膨化过程中,茶渣蛋白变性展开^[20],使得更多的具有自由基清除能力的作用位点暴露,从而显示出更高的抗氧化能力。Welzel^[21]也发现挤压膨化预处理能提高酶解法制备的高温粕大豆肽的抗氧化能力。

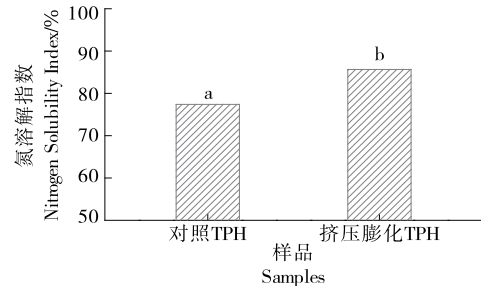
2.2.2 溶解性 由图4可知,经挤压膨化预处理后提取的TPH氮溶解性指数高达(85.62±0.32)%,显著高于未处理样品(P<0.05),均高于王洪新等^[7]及Ren等^[14]的报道,可与大豆分离蛋白相媲美,因此TPH具有在食品领域中广泛应用的潜力。

2.2.3 乳化性 由图5可知,在受试浓度范围内,TPH乳化性随浓度的增加而下降,乳化稳定性则先下降后上升。根据蛋白聚集理论^[25-26],这可能是由于浓度的增加,溶液中多肽分子间会由于疏水相互作用等作用力而发生聚集,减少了分子表面疏水基团,因此不利于其在油水界面的吸附及展开,降低了其乳化性及初期的乳化稳

定性;随浓度增加,多肽分子聚集增大,其在油水界面形成的膜增厚,从而有利于乳化稳定性的升高。

当浓度≤10 mg/mL时,挤压膨化预处理TPH的乳化性显著提高(P<0.05),但其乳化稳定性在不同浓度下均显著下降,见图5(b)。这可能是由于挤压膨化后,多肽链延展暴露更多疏水基团,更有利于其快速地吸附到油水界面并展开,因此乳化性升高,但同时也造成了分子柔性的下降,不利于界面膜的黏弹性^[22,27],导致乳化稳定性下降。

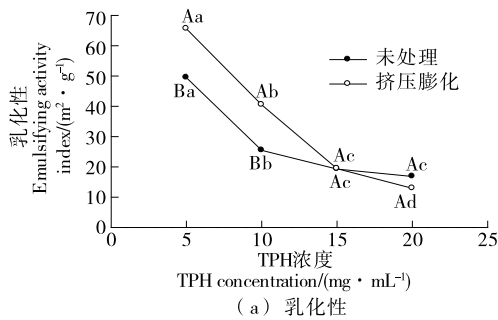
2.2.4 起泡性 由图6可知,经预处理的TPH起泡性及



小写字母不同表示不同样品的差异显著(P<0.05)

图4 挤压膨化预处理对茶渣蛋白水解物溶解度的影响

Figure 4 Effect of extrusion pretreatment on the solubility of Tie Guanyin residue protein hydrolylates

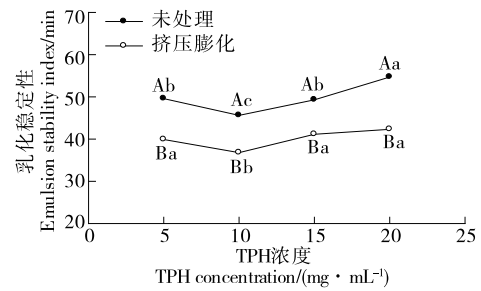


(a) 乳化性

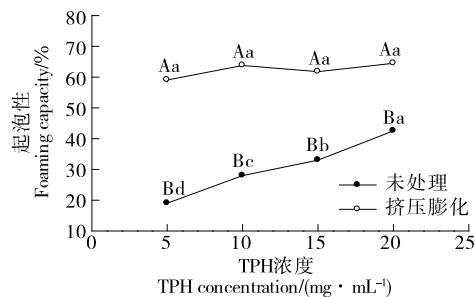
大写字母不同表示同一样品在不同浓度下的差异显著(P<0.05);小写字母不同表示相同浓度下不同样品的差异显著(P<0.05)

图5 挤压膨化预处理对茶渣蛋白水解物(TPH)乳化性及乳化稳定性的影响

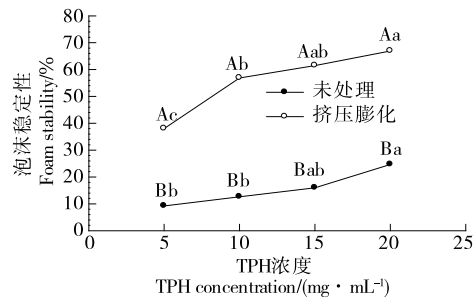
Figure 5 Effect of extrusion pretreatment on the emulsifying activity index (EAI) and emulsion stability index (ESI) of Tie Guanyin residue protein hydrolylates (TPH)



(b) 乳化稳定性



(a) 起泡性



(b) 泡沫稳定性

大写字母不同表示同一样品在不同浓度下的差异显著(P<0.05);小写字母不同表示相同浓度下不同样品的差异显著(P<0.05)

图6 挤压膨化预处理对茶渣蛋白水解物(TPH)起泡性及泡沫稳定性的影响

Figure 6 Effect of extrusion pretreatment on the foaming capacity (FC) and foam stability (FS) of Tie Guanyin residue protein hydrolylates (TPH)

泡沫稳定性均得到大幅改善,当蛋白浓度为 10 mg/mL 时,其起泡性及泡沫稳定性较未处理样品分别提高到了 $(63.75 \pm 1.77)\%$ 和 $(56.85 \pm 1.20)\%$,同样的测试条件下高于 Ren 等^[14]所报道的乌龙茶蛋白。这可能是经挤压膨化预处理后,蛋白疏水性增强^[22],从而快速吸附至气-液界面,使界面表面张力降低,蛋白浓度增加,蛋白的起泡性及泡沫稳定性增强。

3 结论

通过响应面试验优化了铁观音茶渣挤压膨化预处理的最适工艺条件为物料含水量 15%,套筒温度 97 °C,螺杆频率 40 Hz,该条件下预处理辅助碱酶法提取,茶渣蛋白水解物提取率为 $(71.37 \pm 0.09)\%$,显著高于直接采用碱酶法提取 ($P < 0.05$),表明该挤压膨化辅助碱酶法提取铁观音茶渣蛋白水解物的工艺可行。抗氧化性及功能特性试验表明,挤压膨化预处理有助于铁观音茶渣蛋白水解物的 DPPH· 和 ABTS⁺· 清除率的提高,其 IC_{50} 值分别为维生素 C 的 1/4 和 1/2,应用于食品体系中具有延长货架期潜力;同时对其乳化性和起泡能力有较大改善作用,说明其在食品乳化及泡沫体系中的应用具有潜在可能性。后续可通过改性进一步提高铁观音茶渣蛋白水解物功能特性,并对在具体食品模型中的应用进行研究,以利于铁观音茶渣资源的合理利用和深度开发。

参考文献

- [1] 龚舒蓓, 林铃敏. 茶渣的再利用研究进展[J]. 饮料工业, 2019, 22(4): 76-79.
- [2] 周绍迁. 茶渣的高值化综合利用进展[J]. 中国茶叶加工, 2019(4): 54-60.
- [3] YANG Dou-dou, LIANG Jin, WANG Yun-sheng, et al. Tea waste: An effective and economic substrate for oyster mushroom cultivation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(2): 680-684.
- [4] HUSSAIN S, ANJALI K, HASSAN S, et al. Waste tea as a novel adsorbent: A review[J]. Applied Water Science, 2018, 8(165): 1-16.
- [5] OZTURK S, SUTCU M, ERDOGMUS E, et al. Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217(1): 592-599.
- [6] 王珺, 董文宾, 杨芙莲, 等. 富硒茶中硒蛋白冻融法辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 211-215.
- [7] 王洪新, 胡昌云. 茶叶蛋白质的改性及其功能性质研究[J]. 食品科学, 2005, 26(6): 135-140.
- [8] LI Xu, SHEN Shian, DENG Jun-lin, et al. Antioxidant activities and functional properties of tea seed protein hydrolysates (*Camellia oleifera* Abel.) influenced by the degree of enzymatic hydrolysis[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(6): 2 075-2 082.
- [9] 杨旭, 任珍. 茶渣蛋白糖基化改性工艺优化及功能特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 172-177.
- [10] 谢蓝华, 杜冰, 张嘉怡, 等. 不同提取方法对茶渣蛋白功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(21): 130-133.
- [11] 李圆圆, 王洪新, 殷飞, 等. 响应面优化酶法提取茶渣蛋白的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(7): 247-251.
- [12] CUI Qiao-yun, NI Xing-hong, ZENG Liang, et al. Optimization of protein extraction and decoloration conditions for tea residues[J]. Horticultural Plant Journal, 2017, 3(4): 172-176.
- [13] 黄梦姣, 刘宁, 孙玉姣, 等. 三种茶渣挤压改性及水合特性研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 24-28.
- [14] REN Zhong-yang, CHEN Zhong-zheng, ZHANG Yuan-yuan, et al. Functional properties and structural profiles of water-insoluble proteins from three types of tea residues[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 110(1): 324-331.
- [15] SHEN Lian-qing, WANG Xian-yang, WANG Zhong-ying, et al. Studies on tea protein extraction using alkaline and enzyme methods [J]. Food Chemistry, 2008, 107(2): 929-938.
- [16] YANG Xu, LV Yuan-ping. Purification, characterization, and DNA damage protection of active components from Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) hull[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(6): 1 959-1 966.
- [17] ROBERTA R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. Free radical biology & medicine, 1999, 26(9/10): 1 231-1 237.
- [18] BENELHADJ S, GHARSALLAOUI A, DEGRAEVE P, et al. Effect of pH on the functional properties of Arthrospira (Spirulina) platensis protein isolate[J]. Food Chemistry, 2016, 194(1): 1 056-1 063.
- [19] 杜琛, 尹欢欢, 赵城彬, 等. 超声处理对红豆蛋白-叶黄素复合物结构和功能性质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 104-112.
- [20] 魏益民, 杜双奎, 赵学伟. 食品挤压理论与技术: 上[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 281.
- [21] WELZEL P B. Investigation of adsorption-induced structural changes of proteins at solid/liquid interfaces by differential scanning calorimetry[J]. Thermochimica Acta, 2002, 382(1): 175-188.
- [22] 李杨, 齐宝坤, 隋晓楠, 等. 真空挤压膨化预处理水酶法提取大豆蛋白工艺研究[J]. 大豆科技, 2019(增刊 1): 393-396.
- [23] 李永富. 茶渣蛋白和茶渣多肽的制备及性质的初步研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2015: 31-32.
- [24] 杨旭, 谢盈. 茶渣蛋白的分离纯化及其性质研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 146-150.

(下转第 214 页)

- Food Hydrocolloid, 2007, 21: 237-244.
- [37] LI Jun-hua, LI Xin, WANG Chen-ying, et al. Characteristics of gelling and water holding properties of hen egg white/yolk gel with NaCl addition[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 87-93.
- [38] LI Jun-hua, ZHANG Yu-fan, FAN Qiao, et al. Combination effects of NaOH and NaCl on the rheology and gel characteristics of hen egg white proteins [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 1-6.
- [39] DENG Chun-yang, SHAO Yao-yao, XU Ming-sheng, et al. Effects of metal ions on the physico-chemical, microstructural and digestion characteristics of alkali-induced egg white gel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105956.
- [40] 段云霞, 赵英, 迟玉杰. 基于低场核磁共振技术分析不同贮藏条件下白煮蛋水分分布及品质变化[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 26-32.
- [41] 王勇章, 李睿, 李智, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋全蛋液热凝固性的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 62-66.
- [42] 黄笛, 李翠云, 万敏惠, 等. 不同 TGase 添加量对蛋黄粉乳化性和凝胶性的影响[J/OL]. 食品与发酵工业. (2020-08-12) [2020-11-10]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024786>.
- [43] 刘松, 张东旭, 堵国成, 等. 微生物谷氨酰胺转氨酶的表达及分子改造研究进展[J]. 生物工程学报, 2011, 27(12): 1 681-1 689.
- [44] ALAVI Farhad, EMAM-DJOMEH Zahra, CHEN Lingyun. Acid-induced gelation of thermal co-aggregates from egg white and hempseed protein; Impact of microbial transglutaminase on mechanical and microstructural properties of gels[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105960.
- [45] WEN Xiao-yu, JIN Feng, REGENSTEIN M Joe, et al. Transglutaminase induced gels using bitter apricot kernel protein; Chemical, textural and release properties[J]. Food Bioscience, 2018, 26: 15-22.
- [46] 徐东红. 酶法制备高特性蛋清蛋白粉工艺研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 17-22.
- [47] 陈曙光. 多酚氧化酶交联鸡蛋卵白蛋白的研究及交联产物制备的中试生产设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 56-57.
- [48] NYEMB Kéra, GUÉRIN-DUBIARD Catherine, PÉZENNEC Stép Hane, et al. The structural properties of egg white gels impact the extent of in vitro protein digestion and the nature of peptides generated [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 315-327.
- [49] 苏芳萍. 蛋清蛋白微颗粒及其再制凝胶性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 66-68.
- [50] ZHAO Yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Changes of microstructure characteristics and intermolecular interactions of preserved egg white gel during pickling[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 323-330.
- [51] ZHAO Yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Formation mechanism of ovalbumin gel induced by alkali[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 390-398.
- [52] HUANG Xiao-ling, LI Jun-hua, CHANG Cui-hua, et al. Effects of NaOH/NaCl pickling on heat-induced gelation behaviour of egg T white[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124939.
- [53] 陈晓, 郭善广, 周伦, 等. 温度对蛋清碱诱导凝胶形成的影响及机理研究[J]. 食品工业, 2017, 38(12): 196-200.
- [54] 杜文琪, 蒋盼盼, 胥伟, 等. 糖基化反应改善蛋清粉凝胶性的影响因素研究[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 185-189.
- [55] WANG Chen-ying, REN Xi-dong, SU Yu-jie, et al. Application of glycation in regulating the heat-induced nanoparticles of egg white protein [J]. Nanomaterials, 2018, 8 (11): 8110943.
- [56] ALAVI Farhad, EMAM-DJOMEH Zahra, SALAMI Maryam, et al. Effect of microbial transglutaminase on the mechanical properties and microstructure of acid-induced gels and emulsion gels produced from thermal denatured egg white proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 523-532.
- [57] ALAVI Farhad, EMAM-DJOMEH Zahra, MOMEN Shima, et al. Fabrication and characterization of acid-induced gels from thermally-aggregated egg white protein formed at alkaline condition[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105337.
- [58] 崔冰. 卵白蛋白-CMC 复合体系相行为及糖基化改性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 34-35.
- [59] 雷明辉. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋蛋清热凝固性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015: 14-27.
- [60] 周绪霞, 陈婷, 吕飞, 等. 茶多酚改性对蛋清蛋白凝胶特性的影响及机理[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 13-18.
- [61] XUE Hui, TU Yong-gang, XU Meng, et al. Changes in physicochemical properties, gel structure and in vitro digestion of marinated egg white gel during braising[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127321.
- [62] 张明, 吴子男, 王稳航. 香菇脚纤维制备与性能评价及对蛋清凝胶特性的影响[J/OL]. 食品工业科技. (2020-06-24) [2020-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200623.1459.032.html>.
-
- (上接第 174 页)
- [25] POULSON B, SZCZEPSKI K, LACHOWICZ J, et al. Aggregation of biologically important peptides and proteins: Inhibition or acceleration depending on protein and metal ion concentrations[J]. RSC Advances, 2020, 10(1): 215-227.
- [26] SINGH G, BROVCHENKO I, OLEINIKOVA A, et al. Peptide aggregation in finite systems [J]. Biophysical Journal, 2008, 95(7): 3 208-3 221.
- [27] LAM R, NICKERSON M. Food proteins: A review on their emulsifying properties using a structure function approach[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 975-984.