

高剪切乳化技术辅助提取荷叶水不溶性膳食纤维 工艺优化及其物性分析

郑 慧, 夏 欣, 何奕洁, 李 丹, 王乐琪, 邓创业, 杨 勇*

湖南中医药大学药学院食品药品工程系, 长沙 410208

摘要:为扩大荷叶在食品加工中的开发应用性,研究采用高剪切乳化技术辅助提取荷叶水不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF),优化提取工艺;测定其基本物性,并与常规粉碎、球磨式粉碎处理进行对比。结果表明,在剪切转速 8 000 rpm 剪切时间 4 min,酸液浓度 0.25 mol/L,酸解温度 45 °C 条件下荷叶 IDF 得率最高,为 83.84 %。此荷叶 IDF 水溶性 13.81%,持水性 5.65 g/g,持油性 1.97 g/g,膨胀性 1.93 mL/g。与球磨式粉碎相比,处理时间短,荷叶纤维呈束状、层次分明,荷叶纤维内质未被完全破坏;产品水溶性较低,持水性和膨胀性较高。高剪切乳化技术在食品纤维组分的加工中具有较好的应用潜力。

关键词:荷叶;高剪切乳化技术;水不溶性膳食纤维;物性分析;纤维改性

中图分类号:TS255.1

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2021)2-0275-07

DOI:10.16333/j.1001-6880.2021.2.012

Optimization of high shear emulsification assisted extraction of insoluble dietary fiber from lotus leaf and its physical properties

ZHENG Hui, XIA Xin, HE Yi-jie, LI Dan, WANG Le-qi, DENG Chuang-ye, YANG Yong*

¹Department of Food and Drug Engineering, College of Pharmacy, Hunan University of Traditional Chinese Medicine, Changsha 410208, China

Abstract: In order to expand the development of lotus leaf in food processing, insoluble dietary fiber (IDF) of lotus leaf was extracted by high shear emulsification. Its basic physical properties of the IDF were determined and compared with the IDF extracted by conventional smashing and ball grinding. The results showed that the lotus leaf IDF yield extracted by high shear emulsification was the highest (83.84%) at a shear speed of 8 000 rpm, a shear time of 4 min, an acid concentration of 0.25 mol/L, and an acid hydrolysis temperature of 45 °C. The water solubility, water holding capacity, oil holding capacity and expansibility of the IDF were 13.81%, 5.65 g/g, 1.97 g/g and 1.93 mL/g, respectively. Compared with ball grinding, the treatment time of high shear emulsification was shorter, the lotus leaf fiber structure was not completely destroyed, the fiber in SEM diagram showed a bundle structure and distinct layers, and the water solubility was lower, the water holding capacity and expansion property were higher. High shear emulsification technology has a good application potential in the processing of high-fiber food.

Key words: lotus leaf; high shear emulsification; insoluble dietary fiber; physical property analysis; fibre modification

“荷叶服之,令人瘦劣”,荷叶自古就被誉为瘦身良药,目前已被中国卫生部纳入“既是食品又是药品”资源。研究表明,荷叶富含纤维、多酚及生物

碱类物质,具有降脂减肥、抗抑郁等多种保健作用^[1-3]。荷叶在中国种植广泛,种植面积约 900 ~ 1 100 万亩,但其资源利用率极低。近年来荷叶相关研究多集中在生物碱、多酚上^[4,5],而干荷叶中比重较大的纤维组分几乎未见报道。荷叶纤维呈致密、束状结构,食用性较差,对荷叶全叶开发利用势必要进行荷叶纤维的改性处理。

膳食纤维因其在机体内几乎不被消化吸收,热

收稿日期:2020-07-02 接受日期:2020-11-13

基金项目:湖南省大学生创新创业训练计划(2019105410 33);湖南省现代农业产业技术体系建设专项(2019-47-2130 106);湖南中医药大学双一流食品科学与工程学科建设经费(4901020000200902)

* 通信作者 Tel:86-731-88458331; E-mail: yangyong@hnuocm.edu.cn

量低,而成为近年来的研究热点。其中水不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)具有较好的吸水膨胀性,可促进胃肠蠕动,增加机体饱腹感减少摄食量;同时可物理包裹、吸附食物中的油脂、糖、淀粉等高热量组分,减缓或降低机体的吸收,故多用于减肥、降血脂、降血糖、调节胃肠道等功能食品的开发中^[6,7]。很多食品中纤维类组分含量丰富,结构致密,在生产加工中多结合酶法、酸法、碱法等化学方式,或粉碎、高压、微波等物理方式对纤维进行改性处理,以改善产品的感官品质,提高产品的开发应用性^[8-10]。高剪切乳化技术通过高速旋转的转子与定子工作腔的配合使液体在高速流动下产生液体剪切,在剪切力的作用下使得液体中的物料微粒化,在食品行业中可作为物料的分散、乳化、均质、破碎处理,具有处理时间短、应用范围较广、操作简单的特点^[11-13],但目前将其应在食品纤维组分的研究中相对较少。本研究拟采用高剪切乳化技术辅助酸法提取荷叶 IDF,优化提取工艺;对其基本物性进行分析,并与常规粉碎、球磨粉碎制备的荷叶 IDF 进行对比。探究高剪切乳化技术在高纤维食品中的应用可行性,为荷叶进一步的开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与主要仪器

1.1.1 材料与试剂

材料:干荷叶购于湖南振兴中药有限公司,批号 18112508。试剂:盐酸、氢氧化钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.1.2 主要仪器

FM20-D 型高剪切分散乳化机(上海弗鲁克流体机械制造有限公司);XQM-2 行星式球磨机(湖南长沙天创粉末技术有限公司);FW100 粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司),EVO 18 扫描电子显微镜(德国蔡司公司);DZKW-4 型电子恒温水浴锅(北京中兴伟业仪器有限公司);L550 型台式低速大容量离心机(湖南湘仪公司);AV1120 型电子分析天平(日本岛津仪器有限公司);ZHWHY-200D 型恒温振荡器(上海智诚分析仪器制造有限公司);101-3AB 型电动鼓风干燥箱(北京中兴伟业仪器有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 荷叶 IDF 的提取方法

市售干荷叶用 FW100 粉碎机粉碎 2 min,过 50 目筛得到荷叶粉(lotus leaf powder, LLP)。将 LLP

置于行星式球磨机中 600 rpm 处理 20 min,得到经球磨处理的荷叶粉(ball mill lotus leaf powder, BLLP)。

分别称取 LLP、BLLP 按 1:25 (g:mL) 的料液比加入 0.25 mol/L HCl 溶液中,置于 45 °C 恒温水浴酸解 2 h,用 NaOH 调 pH 至中性,4 000 rpm 离心 10 min,取沉淀置于经 80 °C 鼓风干燥至恒重,分别得到荷叶 IDF、球磨式粉碎辅助制备的荷叶 IDF(ball mill lotus leaf insoluble dietary fiber, BILDF)。

称取 LLP 按 1:25 (g:mL) 的料液比加入一定浓度的酸溶液中,在一定转速下高剪切乳化处理一定时间后,恒温水浴酸解,后续工艺参数同前,得到高剪切乳化辅助酸法提取的荷叶 IDF(high shear emulsifier lotus leaf insoluble dietary fiber, HILDF)^[14,15]。同时,为对比前期的粉碎处理、后期的酸解处理对荷叶纤维结构的影响,试验将 LLP 置于蒸馏水中 8 000 rpm 下剪切乳化处理 4 min,4 000 rpm 离心 10 min,取沉淀干燥后得到高剪切乳化处理后的荷叶粉(high shear emulsifier lotus leaf powder, HLLP),备用。

1.2.2 HILDF 提取的单因素试验

1.2.2.1 剪切转速对 HILDF 得率的影响

固定剪切时间为 3 min、酸液浓度为 0.15 mol/L、酸解温度为 60 °C,考察不同剪切转速(6 000、7 000、8 000、9 000、10 000 rpm)对 HILDF 得率的影响。

1.2.2.2 剪切时间对 HILDF 得率的影响

固定剪切转速为 7 000 rpm、酸液浓度为 0.15 mol/L、酸解温度为 60 °C,考察不同剪切时间(1、2、3、4、5 min)对 HILDF 得率的影响。

1.2.2.3 酸液浓度对 HILDF 得率的影响

固定剪切转速为 7 000 rpm、剪切时间为 3 min、酸解温度为 60 °C,考察不同酸液浓度(0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mol/L)对 HILDF 得率的影响。

1.2.2.4 酸解温度对 HILDF 得率的影响

固定剪切转速为 7 000 rpm、剪切时间为 3 min、酸液浓度为 0.20 mol/L,考察不同酸解温度(30、45、60、75、90 °C)对 HILDF 得率的影响。按公式(1)计算 IDF 得率:

$$y = \frac{m}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: y 为 HILDF 得率,%; m_0 为初始荷叶粉的质量,mg; m 为提取后干燥至恒重的 HILDF 质量,mg。

1.2.3 HIDF 提取的正交试验

在单因素试验的基础上,设计 $L_9(3^4)$ 正交试验,以 HIDF 得率为考察指标。

1.2.4 显微结构观察

分别将 LLP、BLLP、HLLP 三种荷叶粉, IDF、BIDF、HIDF 三种荷叶 IDF,共六个样品进行扫描电子显微镜观察。

1.2.5 荷叶 IDF 持水性的测定

准确称取 0.500 g 的荷叶 IDF 样品,置于 20 mL 离心管内,加入 15 mL 蒸馏水搅拌均匀,室温静置 24 h,4 000 rpm 离心 15 min,倒掉上清液,记录离心管和下层持水荷叶 IDF 的总质量,按公式(2)计算持水力:

$$A = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_0} \quad (2)$$

式中: A 为荷叶 IDF 持水力, g/g; m_0 为荷叶 IDF 的质量, g; m_1 为离心管的质量, g; m_2 为离心后离心管和下层持水荷叶 IDF 的总质量, g。

1.2.6 荷叶 IDF 持油性的测定

准确称取 0.500 g 荷叶 IDF 样品,置于 20 mL 离心管中,加入 15 mL 花生油搅拌均匀,室温静置 24 h,4 000 rpm 离心 15 min,倒掉上层油,记录离心管和下层持油荷叶 IDF 总质量,按公式(3)计算持油力:

$$B = \frac{M_2 - M_1 - M_0}{M_0} \quad (3)$$

式中: B 为荷叶 IDF 持油力, g/g; M_0 为荷叶 IDF 的质量, g; M_1 为离心管的质量, g; M_2 为离心管和下层持油荷叶 IDF 总质量, g。

1.2.7 荷叶 IDF 膨胀性的测定

准确称取 0.500 g 荷叶 IDF 样品,置于 25 mL 量筒中,轻轻抖动使样品平整,读取样品体积并记录,然后加 10 mL 蒸馏水搅拌,室温静置 24 h,读取量筒中样品吸水膨胀后的体积并记录^[16],按公式(4)计算膨胀性:

$$C = \frac{V_1 - V_0}{m} \quad (4)$$

式中: C 为荷叶 IDF 膨胀性, mL/g; m 为荷叶 IDF 的质量, g; V_1 为样品膨胀后的体积, mL; V_0 为样品膨胀前的体积, mL。

1.2.8 荷叶 IDF 水溶性的测定

准确称取 0.500 g 荷叶 IDF 样品,倒入 250 mL 锥形瓶,加入 50 mL 蒸馏水,50 °C、200 rpm 恒温震

荡 30 min,3 000 rpm 离心 15 min,收集沉淀置于 105 °C 烘至恒重后称重^[17]。按公式(5)计算水溶性:

$$D = \left(1 - \frac{m_1}{m_0}\right) \times 100 \quad (5)$$

式中: D 为荷叶 IDF 水溶性, %; m_1 为烘干至恒重的沉淀质量, g; m_0 为荷叶 IDF 的质量, g。

1.2.9 统计分析

每个试样重复 3 次,数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,结果采用平均数 ± 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 剪切转速对 HIDF 得率的影响

高剪切乳化设备的剪切转速可从数千到数万,根据处理的物料、作用目的不同,其剪切转速有所差异。在本试验中,若剪切转速过高、剪切时间过长,荷叶粉末颗粒过细会浮于溶液上层从而影响剪切乳化的效果。由图 1 可知,在剪切转速试验范围内 HIDF 得率先升高后降低,在 7 000 rpm 时 HIDF 得率最高。荷叶中不仅含有 IDF,同时也含有果胶等水溶性膳食纤维^[18]。当剪切转速较低,剪切处理未能较大的破坏荷叶中水溶性膳食纤维的结构,溶于水中的荷叶水溶性膳食纤维中可能包裹、吸附部分不溶性微小颗粒,影响这部分颗粒在离心过程中的沉淀,使 HIDF 得率偏低。随着剪切转速的增加,在较大程度上破坏了荷叶中水溶性膳食纤维结构,减少其对不溶性微小颗粒的包裹吸附,此时 HIDF 得率增加。此后,当剪切转速高于一定数值时,荷叶中纤维素、半纤维素等 IDF 可能被过度粉碎或酸解,同时部分微小颗粒会浮于溶液上层,不易被离心沉淀,这些都导致荷叶 HIDF 的得率下降。故此,选择剪切转速为 7 000 rpm。

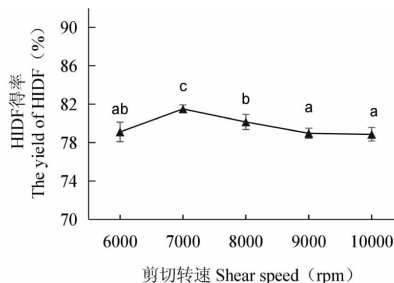


图 1 剪切转速对 HIDF 得率的影响

Fig. 1 Effect of shear speed on the yield of HIDF

2.1.2 剪切时间对 HIDF 得率的影响

由图 2 可知,在剪切时间的试验范围内 HIDF

得率在 3 min 时最高。剪切时间对 HIDF 得率的影响与剪切转速的影响趋势总体相似,先增加后降低。这可能因为剪切时间过短,未能破坏荷叶中的水溶性膳食纤维,从而包裹吸附部分不溶性微小颗粒,使得离心沉淀量偏低,HIDF 得率偏低;剪切时间过长,使得荷叶 IDF 被过度酸化或粉碎,也会使得 HIDF 得率偏低。故此,选择剪切时间为 3 min。

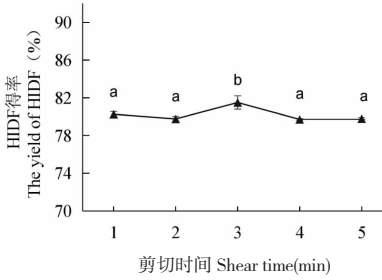


图2 剪切时间对 HIDF 得率的影响

Fig. 2 Effect of shear time on the yield of HIDF

2.1.3 酸液浓度对 HIDF 得率的影响

酸提是常用的一种膳食纤维提取方法,因工艺简单、条件易于控制,在工业大规模生产中应用较为普遍。提取过程中,酸液浓度过高会影响荷叶的色泽、风味等感官品质;酸液浓度过低,不足以酸解荷叶中的可消化成分,提取出的 IDF 含杂量高。由图 3 可知,在实验的酸液浓度范围内,HIDF 得率随酸液浓度增加而不断提高,直到酸液浓度达 0.20 mol/L,增速减缓,HIDF 得率逐渐趋于平稳。这与酸液对荷叶中水溶性膳食纤维、IDF、淀粉、蛋白质等成分的破坏相关。从后期工艺处理的因素考虑,选择酸液浓度为 0.20 mol/L。

2.1.4 酸解温度对 HIDF 得率的影响

由图 4 可知,当酸解温度在 30~90 °C 之间时,随着温度的增加 HIDF 得率逐渐减小。温度上升可促进酸解,破坏荷叶 IDF 结构,使 IDF 长链分解成短链,在一定程度上可改善产品的质构及其感官品质;但另一方面,温度过高又会使荷叶中的 IDF 过度酸解导致 HIDF 得率下降,同时长时间高温又会影响荷叶

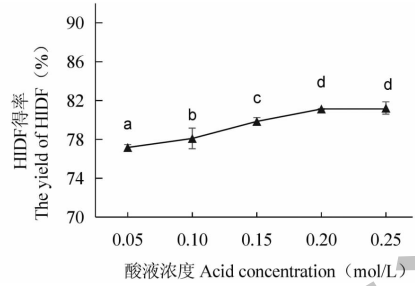


图3 酸液浓度对 HIDF 得率的影响

Fig. 3 Effect of acid concentration on the yield of HIDF

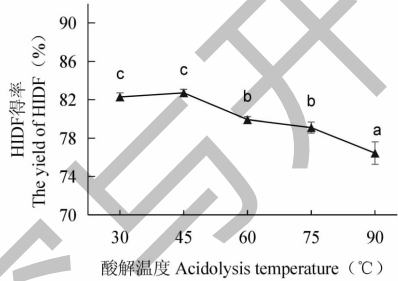


图4 酸解温度对 HIDF 得率的影响

Fig. 4 Effect of acidolysis temperature on the yield of HIDF

的营养成分、感官品质。因此,选择酸解温度为 45 °C。

2.2 正交试验结果及数据分析

从表 1 及表 2 可以看出,4 个因素对 HIDF 得率影响力: C > D > A > B, 即酸液浓度 > 酸解温度 > 剪切转速 > 剪切时间,最佳提取工艺条件为 A₃B₃C₃D₂, 即剪切转速 8 000 rpm, 剪切时间 4 min, 酸液浓度 0.25 mol/L, 酸解温度 45 °C。以按此条件进行验证实验, HIDF 得率为 83.84% ± 0.04%, 高于正交实验中最高值。

2.3 荷叶粉及荷叶 IDF 电镜扫描

从 3 种荷叶粉的 SEM 图 5 可知, LLP 荷叶颗粒最大, 因 BLLP、HLLP 在 LLP 的基础上分别进行了球磨处理、高剪切乳化处理, 颗粒粒径相对较小。LLP 致密的束状纤维结构明显可见, 表面黏附有较多的细小微粒。BLLP 是在 LLP 基础上经过了干法研磨, 荷叶纤维结构被明显破坏, 几乎不可见致密的

表 1 正交因素水平表

Table 1 Level table of orthogonal factors

水平 Level	A 剪切转速 Shear speed (rpm)	B 剪切时间 Cut time (min)	C 酸液浓度 Acid concentration (mol/L)	D 酸解温度 Acidolysis temperature (°C)
1	6 000	2	0.15	30
2	7 000	3	0.20	45
3	8 000	4	0.25	60

表 2 正交实验结果
Table 2 Orthogonal experiment results

试验号 Test number	A	B	C	D	IDF 得率 IDF yield (%)
1	1	1	1	1	81.27
2	1	2	2	2	83.12
3	1	3	3	3	82.01
4	2	1	2	3	80.99
5	2	2	3	1	83.66
6	2	3	1	2	81.85
7	3	1	3	2	83.78
8	3	2	1	3	80.59
9	3	3	2	1	83.63
k1	246.40	246.04	243.71	248.56	
k2	246.50	247.37	247.74	248.75	
k3	248.00	247.49	249.45	243.59	
R	1.60	1.45	5.74	5.16	

束状纤维,同时表面黏附较多的细小微粒;故此,与剪切作用相比,冲击、挤压、研磨更易于破坏纤维内质,使致密的纤维结构变得松散。HLLP 是在 LLP 基础上通过湿法高剪切乳化处理后干燥而得,颗粒粒径减小,束状纤维结构未被完全破坏,纤维上的空隙较多;且因采用湿法处理,部分水溶性的成分已溶于水中被除去,黏附在荷叶纤维上的细小颗粒相对较少。

从 3 种荷叶 IDF 的 SEM 图 6 可知,荷叶 IDF 显微结构的差异性与酸解前的荷叶粉相似,表明前期

粉碎处理对荷叶纤维结构的影响大于在本实验浓度下酸解对荷叶纤维结构的影响。其中,BIDF 束状纤维结构被破坏,不能明显被观察到;IDF、HIDF 中束状纤维结构明显可见,层次分明,且 HIDF 比 IDF 颗粒更小、纤维表面孔隙率更高。从显微结果可推知,不同粉碎方式荷叶 IDF 的粒径大小、纤维形态、表面孔隙率不同,可能使得荷叶 IDF 的理化性质、感官品质、功能特性存在差异,从而影响产品进一步的开发应用性。

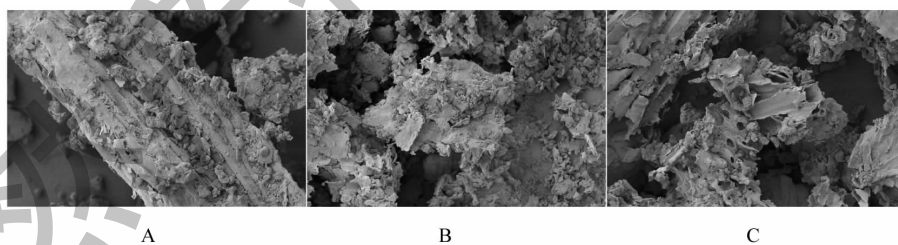


图 5 LLP(A)、BLLP(B)、HLLP(C)的 SEM 图(×1 000)

Fig. 5 SEM of LLP(A), BLLP(B), HLLP(C) (×1 000)

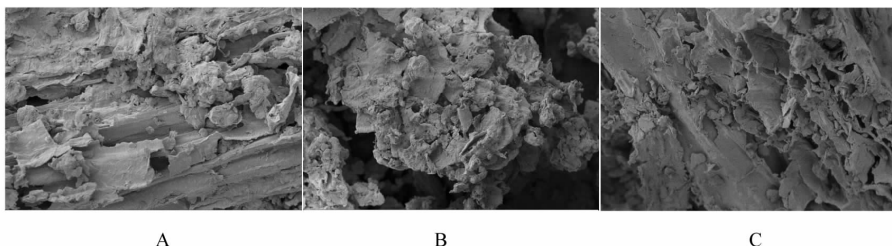


图 6 IDF(A)、BIDF(B)、HIDF(C)的 SEM 图(×2 000)

Fig. 6 SEM of IDF(A), BIDF(B), HIDF(C) (×2 000)

2.4 荷叶 IDF 的持水性、持油性、膨胀性

IDF 在体内不产生热量,主要通过吸水溶胀促进胃肠蠕动,物理包裹吸附油脂、碳水化合物、葡萄糖等成分而发挥功效,故持水性、持油性、膨胀性为 IDF 的基本物性指标。如表 3 所示,3 种荷叶 IDF 的持水性差异相对较小。3 种荷叶 IDF 的持油性为 BIDF > HIDF > IDF,其中 BIDF、HIDF 与 IDF 存在显

表 3 荷叶 IDF 的持水性、持油性、膨胀性

Table 3 Water holding capacity, oil holding capacity and expansibility of lotus leaf IDF

样品 Sample	持水性 Water retention (g/g)	持油性 Oil retention (g/g)	膨胀性 Expansibility (mL/g)
IDF	5.41 ± 0.12 ^a	1.20 ± 0.06 ^a	2.53 ± 0.28 ^c
BIDF	5.53 ± 0.08 ^{ab}	2.09 ± 0.30 ^b	0.93 ± 0.12 ^a
HIDF	5.65 ± 0.12 ^b	1.97 ± 0.22 ^b	1.93 ± 0.12 ^b

注:同一列不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: The different letters in the same column indicate the differences are significant ($P < 0.05$).

2.5 荷叶 IDF 的水溶性

在膳食纤维提取方法中酸提具有工艺简单、成本低廉、易于生产等优势,但存在原料中淀粉、蛋白质等可消化成分酸解不彻底的缺点。试验通过测定 3 种荷叶 IDF 的水溶性,初步判定荷叶酸解程度及其纯度。由图 7 可知,BIDF 的水溶性最高。结合荷叶 IDF 的 SEM 图分析,球磨式粉碎处理的作用力主要为冲击和研磨,这种方式对荷叶致密束状的纤维结构有明显的破坏,荷叶粒径变小、致密的纤维结构变得松散,在提取过程中更易于包裹、吸附水溶性成分;同时,BIDF 的颗粒粒径更小,水溶性测定时也易于溶入水中。常规粉碎和高剪切乳化粉碎处理对纤维的内质结构影响较小。荷叶纤维结构仍然相对致密,在提取过程中不易于包裹、吸附水溶性成分,故其水溶性均相对较低。同时,与 IDF 相比,HIDF 又经过了液力剪切处理,颗粒粒径更小,更易于在水中分散,故 HIDF 的水溶性略高于 IDF。

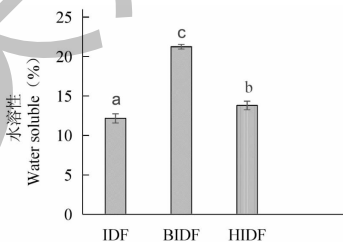


图 7 荷叶 IDF 的水溶性

Fig. 7 Water soluble of lotus leaf IDF

注:不同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。Note: The different letters in the same column indicate the differences are significant ($P < 0.05$).

著性差异,这可能因为 BIDF、HIDF 粒径相对较小,各组分及其亲脂基团更多的暴露,易于吸附油脂,从而改善了荷叶 IDF 的持油性^[19,20]。3 种荷叶 IDF 的膨胀性为 IDF > HIDF > BIDF,这可能与 IDF、HIDF 中荷叶纤维颗粒相对较大、纤维网络较长,且表面的孔隙率较高,更易于包裹水分,吸水膨胀。

3 结论

本研究采用高剪切乳化技术辅助酸法提取荷叶 IDF,基于单因素试验、正交试验优化提取工艺。结果表明,剪切转速 8 000 rpm,剪切时间 4 min,酸液浓度 0.25 mol/L,酸解温度 45 °C 条件下荷叶 IDF 得率最高,为 83.84%。因荷叶原料的特殊性,剪切时间过长、剪切转速过高,荷叶微粉会浮于上层影响剪切效果。正交实验结果可知,在各参数的试验范围内,剪切转速、剪切时间对 HIDF 得率的影响作用相对较小;但从后续相关物性指标来看,该条件下高剪切乳化处理对原料已有较为明显的影响。

在食品加工中,粉碎是最常见的一种纤维改性处理方式。常规粉碎利用高速旋转的刀片对物料进行物理剪切、破碎。行星式球磨机在转盘上装有磨筒,磨筒中装有物料和研磨介质,通过在磨筒公转和自转作用下,磨筒中的研磨介质对物料进行冲击和研磨^[21]。这两种设备均可处理干物料、湿物料,纤维类原料多采用干法处理。与前两者不同,高剪切乳化技术是通过高速运动的流体在流体内部产生的剪切力对物料进行破碎,且仅能处理湿物料。近年来,高剪切乳化技术已被应用到药物、食品研究相关的诸多领域。目前将其应在食品纤维组分的研究中相对较少,其中 Ma 等^[13]发现高剪切乳化技术可提高孜然纤维的提取率,并对产品的功能特性有所改善。本研究结果表明,球磨式粉碎对荷叶纤维内质影响较大,而高剪切乳化处理对物料纤维内质影响较小,荷叶纤维束状结构清晰可见。在同等粒径条

件下,球磨式粉碎处理产品的食用感官品质可能优于高剪切乳化处理。另一方面,高剪切乳化处理产品水溶性较低,具有较好的吸水膨胀性特性,利于促进胃肠蠕动,增加饱腹感减少摄入量;同时避免了其它方式在处理时因设备温度升高、时间较长而对物料造成的影响。综上,与其它纤维改性处理相比,高剪切乳化技术处理高纤维食品具有其独特性,在高纤维食品的加工中具有较好的应用潜力。

参考文献

- Chai JZ, Jiang L, Wei JQ, et al. Research progress of fall fat and antioxidant effect of the lotus leaf [J]. Food Res Dev (食品研究与开发), 2016, 285(8): 218-221.
- Du H, You JS, Zhao X, et al. Antiobesity and hypolipidemic effects of lotus leaf hot water extract with taurine supplementation in rats fed a high fat diet [J]. J Biomed Sci, 2010, 17(S1): S42.
- Lee K, Kim J, Lee N, et al. Effects of potato and lotus leaf extract intake on body composition and blood lipid concentration [J]. J Exerc Nutrition Biochem, 2015, 19(1): 25-30.
- Chen X, Qi J. Research progress of flavonoids and alkaloids in lotus leaf [J]. Chin J Exp Tradit Med Form (中国实验方剂学杂志), 2015, 21(18): 211-214.
- Chen S, Zhang H, Liu Y, et al. Determination of lotus leaf alkaloids by solid phase extraction combined with high performance liquid chromatography with diode array and tandem mass spectrometry detection [J]. Anal Lett, 2013, 46: 2846-2859.
- Xu ZH, Xiong X, Zeng QZ, et al. Alterations in structural and functional properties of insoluble dietary fibers-bound phenolic complexes derived from lychee pulp by alkaline hydrolysis treatment [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 127: 109335.
- Zhu Y, Chu J, Lu Z, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italica*) bran [J]. J Cereal Sci, 2018, 79: 456-461.
- Liu W, Ma HL, Luo J, et al. Study on physical Modification technology of dietary fiber of garlic peel [J]. J Chin Food (中国食品学报), 2018, 18(5): 58-67.
- Wang C, Song R, Wei S, et al. Modification of insoluble dietary fiber from ginger residue through enzymatic treatments to improve its bioactive properties [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 125: 109220.
- Bender ABB, Speroni CS, Moro KIB, et al. Effects of microni-
- zation on dietary fiber composition, physicochemical properties, phenolic compounds, and antioxidant capacity of grape pomace and its dietary fiber concentrate [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 117: 108652.
- Zhen ZX, Liu YF, Liu Y, et al. A novel high-speed shear dispersing emulsification pretreatment method for the extraction of active ingredients of *Olea europaea* L [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2013, 25: 1555-1561.
- Huang GX, Huang ZM, Wang Q, et al. Application of high-speed shearing technique in extraction process of total flavonoids from pomelo peel [J]. Chin Food Addit (中国食品添加剂), 2017(10): 124-129.
- Ma MM, Mu TH. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin [J]. Food Chem, 2016, 194: 237-246.
- Wu Y, Yang QS, Zhao HM, et al. Process optimization of extracting water insoluble dietary fiber from Hongxue tea residue by acid method [J]. J Yunnan Minzu Univ; Nat Sci (云南民族大学学报: 自科版), 2017, 26: 185-188.
- An FP, Song JL, Huang CY, et al. Extraction of water insoluble dietary fiber from tea residue [J]. J Fujian Agr For Univ; Nat Sci Edit (福建农林大学学报: 自科版), 2011, 40: 198-204.
- Meng XM, Liu F, Xiao Y, et al. Alterations in physicochemical and functional properties of buckwheat straw insoluble dietary fiber by alkaline hydrogen peroxide treatment [J]. Food Chem, 2019, 3: 100029.
- Zheng H, Chen XP, Chang XL, et al. Response surface optimization of extraction technology of soluble dietary fiber from bee pollen [J]. J Tradit Chin Med Univ Hunan (湖南中医药大学学报), 2015, 35(2): 20-24.
- Shi YQ, Peng H, Zhao Q, et al. Preparation of soluble dietary fiber of lotus leaf residues with cellulase [J]. Food Ind (食品工业), 2017, 38(1): 88-91.
- Zhu D, Zhu LB, Niu GC, et al. Optimization of UHP treatment conditions and characterization of microstructure of sago dregs dietary fiber [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2020, 32: 118-126.
- Hussain S, Li J, Jin W, et al. Effect of micronisation on dietary fibre content and hydration properties of lotus node powder fractions [J]. Int J Food Sci Tech, 2018, 53: 590-598.
- Zhang CS, Rao JH. Application of discrete element Method in simulation of planetary ball mill [J]. China Powder Sci Technol (中国粉体技术), 2015, 21(1): 85-90.