

文章编号:1000-8551(2016)01-0120-10

亚微米级海带粉制备技术研究及物理特性分析

樊琳 娄永江 陈小芳 孙佩璇

(宁波大学海洋学院,浙江 宁波 315211)

摘要:为获得物理特性良好、粒度分布均匀的海带粉体,采用 NaOH 前处理及湿法粉碎技术制备亚微米级海带粉,并通过单因素和响应面分析法优化工艺条件。结果表明:在 NaOH 质量分数 0.19%、浸泡时间 11 min、液固比 20 mL·g⁻¹的条件下,海带粉平均粒度 D₅₀ 为 328.7 nm, D₉₅ 为 825.5 nm,最大粒径为 1 106.2 nm。亚微米级海带粉的物理特性为:休止角为 62.5°、滑角为 70.6°、水溶性为 20.1%、润湿时间为 35.3 s、膨胀力为 1 266%、持水力为 3 197%。与市售超微海带粉相比,亚微米级海带粉休止角增加 20.9°,滑角增加 27.9°,水溶性增加 50.0%,物理特性得到显著改善。本研究可为海带的精深加工提供理论依据。

关键词:亚微米级海带粉;休止角;滑角;溶解性

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2016.01.0120

海带(*Thallus Laminariae*)富含海藻多糖、甘露醇、维生素和多种常量、微量元素,具有医疗保健功能,如调节血脂、降血糖、抗病毒、增强免疫等^[1-5]。虽然海带在我国已有广泛的应用,但多数研究仍处于初级阶段,且海带类加工产品形式单一。将普通粉碎所得到的海带粉直接加入到食品中,产品口感、质地较差,难以被大众接受。超微粉碎因其可获得独特的物理化学性能,大大拓宽了其在食品加工中利用的领域,为海带开发利用开辟了新路径^[6-8]。

江建梅等^[9]以海带为原料,经打浆、胶磨、浓缩等工艺生产褐色海带粉,所得到的海带粉速溶性较好,而且热量低、矿物质高,但是工艺较复杂,且海带主要营养成分在胞内,细胞并未破壁,营养不能被完全吸收。曹新志等^[10]将海带经软化、干燥、粗粉、超微粉碎等处理制成 13 μm 以下的超细粉,与已报道的直径在 5~8 μm 海带雄配子体细胞和直径在 11~22 μm 海带雌细胞体^[11-12]相比,其破壁率较低,营养物质释放率低。为此,本研究通过探讨湿法超微粉碎工艺,生产亚微米级超细海带粉,旨在提高海带破壁率,增加海带营养物质的吸收利用率,为海带的精深加工提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

干海带,产于东海,购于宁波市路林综合市场;超微海带粉,长沙博健生物科技有限公司;氢氧化钠,济宁百川化工有限公司。

SQW-6DI 超微粉碎机,山东三清不锈钢设备有限公司;YB-1000A 型高速多功能粉碎机,上海力箭机械有限公司;TA.XT plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems Ltd;ZS90Zeta 电位及纳米粒度分析仪,英国马尔文公司。

1.2 试验方法

1.2.1 海带软化、粉碎 取一定量的海带洗净,左右剪去 5cm,根部、尾部剪去 10cm,去除表面泥砂、污垢,用 NaOH 溶液进行软化处理,并用水漂洗 3~4 次后,剪成 1 cm×1 cm 大小的碎片,将海带碎片和用柠檬酸调至中性的 NaOH 溶液一并倒入超微粉碎机,粉碎 20 min。在此条件下,考察 NaOH 溶液浓度、浸泡时间、料液比和温度对海带硬度和超微海带粉平均粒度(D₅₀)的影响。

收稿日期:2014-12-09 接受日期:2015-03-16

基金项目:宁波市农业与社会发展攻关项目(2012C10027)

作者简介:樊琳,女,主要从事食品加工与安全研究。E-mail:1161904823@qq.com

通讯作者:娄永江,男,教授,主要从事水产品加工与保鲜研究。E-mail:louyongjiang@nub.edu.cn

1.2.2 硬度的测量 取距离根部 10 cm, 距离左右 5 cm 部位, 剪成 5 cm × 5 cm 大小的海带片, 采用质构剖面分析法(TPA 模式)进行测试, PO. 5S 探头, 每个样品取 3 片, 每片海带取四角及中间共 5 个点。测前速度 5 mm·s⁻¹, 测后速度 5 mm·s⁻¹, 测试速度 1 mm·s⁻¹, 测定间隔时间 5 s, 压缩比为 50%, 触发力 5 g。

1.2.3 海带粉粒度的测量 称取超微海带粉 1.0 g, 加入 20.0 g 水, 超声波分散震荡 15 min, 将样品倒入一次性电位样品池, 控制样品高度为 10 ~ 15 mm。以水作为分散剂, 在温度 25 °C、折射率 1.33、平衡时间 120 s、循环 17 次的条件下测定海带粉粒度分布和平均粒度。

1.2.4 海带粉物理特性的测定 取 A 粉、B 粉以及 C 粉进行物理特性比较。

A 粉: 普通粉碎海带粉。海带洗净, 晒干, 经高速多功能粉碎机粉碎 5 min, 过 30 目和 50 目筛, 颗粒粒径在 270 ~ 500 μm 之间。

B 粉: 市售超微粉碎海带粉。海带经由清洗, 脱水, 初粉, 超微粉碎制得, 颗粒粒径在 10 ~ 20 μm 之间。

C 粉: 本试验制得的亚微米级海带粉。

1.2.4.1 休止角、滑角测定 休止角: 参照 GB/T 11986 - 1989^[13] 进行测量。

滑角: 将玻璃板水平放置, 分别称取 3.00 g 海带粉, 平铺在玻璃板上相同位置, 缓慢抬起玻璃板的一侧, 使之与水平面的夹角不断增大, 待 90% 的海带粉滑动时, 测定玻璃板与水平面的夹角, 即为海带粉滑角^[14]。

1.2.4.2 润湿性测定^[15] 在常温下, 向直径 10 cm 左右的玻璃皿中加 50 mL 蒸馏水, 分别准确称取 1.00 g 海带粉, 快速均匀撒在蒸馏水表面, 测定海带粉被完全润湿所需的时间。

1.2.4.3 水溶性测定^[16] 分别称取 0.50 g (m_1) 海带粉于 100 mL 锥形瓶中, 加 30 mL 蒸馏水, 放在恒温水浴锅中, 90 °C 条件下水浴加热且连续搅拌 30 min, 转移至离心管, 3 000 r·min⁻¹ 离心 15 min。取其上清液于干燥皿中, 105 °C 烘干至恒重, 测定残留物质量 m_2 。

$$\text{海带粉水溶性} = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%$$

1.2.4.4 膨胀力测定^[14] 分别称取 0.50 g 海带粉于 100 mL 量筒中, 记录其体积 V_1 , 加入 50 mL 常温蒸馏水, 并搅拌均匀, 静置 24 h 后, 读取海带粉的体积 V_2 。

$$\text{海带粉膨胀力} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\%$$

1.2.4.5 持水力测定^[16] 分别称取 0.50 g (m_1) 海带粉于 100 mL 烧杯中, 加 30 mL 蒸馏水, 在磁力搅拌器上搅拌 30 min, 转移至离心管, 2 000 r·min⁻¹ 离心 30 min。除去上清液后, 测定残留物质量 m_2 。

$$\text{海带粉持水力} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%$$

1.3 数据处理

数据采用 Excel 2010 和 SAS 8.1 软件进行处理, 方差分析采用 Duncan 法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 海带软化效果与海带粉平均粒度的影响因素研究

2.1.1 软化液浓度对海带软化效果及海带粉平均粒度的影响 称取一定量海带, 保持浸泡时间 15 min、料液比 1:15、温度 25 °C 不变, NaOH 质量分数对海带硬度、弹性及海带粉平均粒度 D_{50} 的影响见图 1。

海带细胞壁及腔液中含有占海带重量 30% 左右的水不溶性褐藻酸和褐藻酸钙聚合物, 这是构成海带韧性的主要原因。NaOH 溶液使海带变软可能是其能与褐藻酸形成微溶的褐藻酸钠, 海带组织发生了一定程度的变化^[17]。由图 1 - A、1 - C 可知, 随着 NaOH 溶液浓度的增加, 海带硬度逐渐降低, 粉碎粒度下降。

随着融融状态的褐藻酸钠吸水膨胀, 其弹性相应增加。而弹性会形成对粉碎棒的冲击力和剪切力等缓冲垫的作用, 从而影响其粉碎效果。在 0 ~ 0.20% 的 NaOH 溶液浓度范围内, 浓度变化与弹性值间存在显著差异, 与此相对应的, 硬度与平均粒度变化也差异显著 ($F_{0.05}$)。由图 1 可知, 0.20% NaOH 溶液浓度是硬度与弹性达到对于粉碎最有利的临界点。

2.1.2 软化时间对海带软化效果及海带粉平均粒度的影响 称取一定量海带, 保持 NaOH 质量分数 0.20%、料液比 1:15 和温度 25 °C 不变, 浸泡时间对海带硬度、弹性及海带粉平均粒度 D_{50} 的影响见图 2。随着浸泡时间的延长, 海带的硬度逐渐降低并趋于稳定, 海带的弹性逐渐增大, 海带粉平均粒度呈先降低后上升趋势。随着浸泡时间的延长, 参与反应的褐藻酸钙聚合物越多, 当反应进行一段时间后, 达到动态平衡, 海带的硬度趋于稳定^[18]。在溶剂水的作用下, 海带逐渐变软。因此, 最佳浸泡时间选择 15 min。

2.1.3 海带质量与软化液体积比对海带软化效果及海带粉平均粒度的影响 称取一定量海带, 保持 NaOH 质量分数 0.20%、浸泡时间 15 min 和温度 25 °C

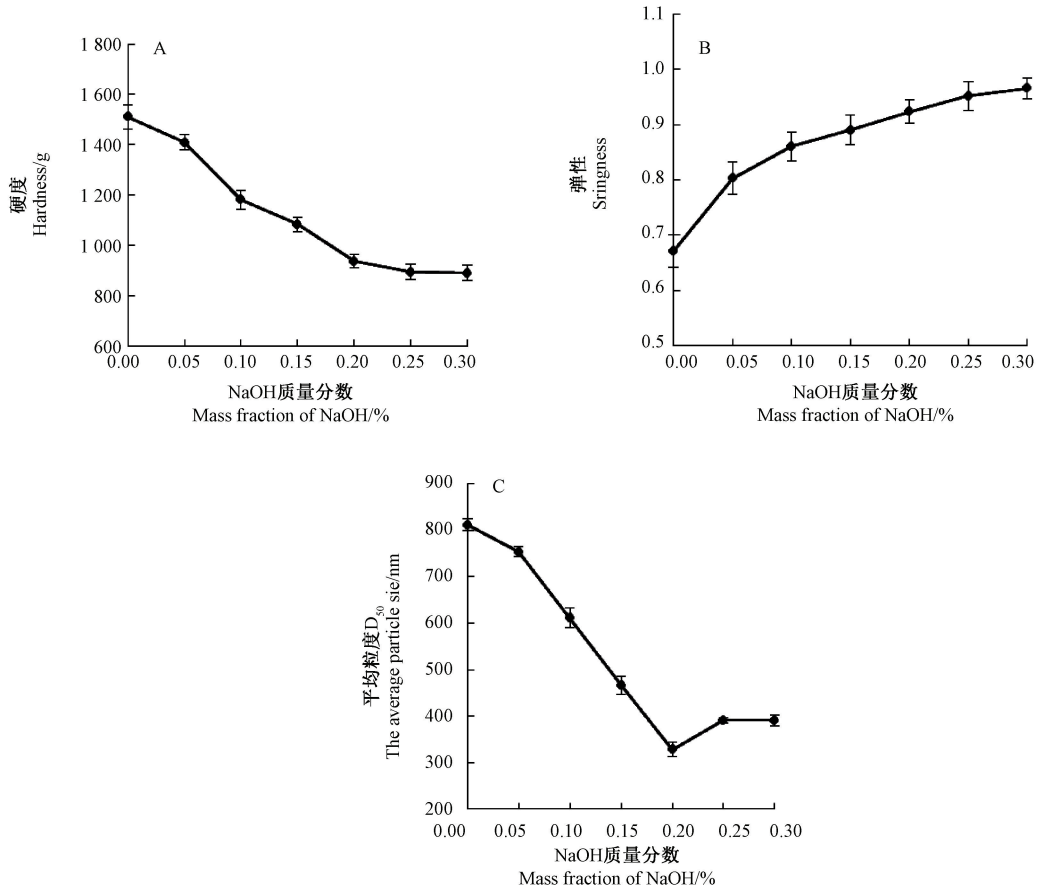


图1 NaOH质量分数对硬度、弹性和平均粒度的影响

Fig.1 Effect of mass fraction of NaOH on the hardness, springiness and the average particle size

不变,海带质量与浸泡液体积比对海带硬度、弹性及海带粉平均粒度 D_{50} 的影响见图3。随着质量体积比的增大,海带的硬度逐渐降低,弹性逐渐增加,海带粉的平均粒度呈先降低后上升的趋势。当质量体积比较小时, Na^+ 、 OH^- 与褐藻钙聚合物并没有反应完全,随着浸泡液的增多,反应逐渐趋于平衡状态,且溶剂水的增多,对海带的软化有利,因此最佳海带质量与浸泡液体积比选择 1:15。

2.1.4 温度对海带软化效果及海带粉平均粒度的影响 称取一定量的海带,保持 NaOH 质量分数 0.20%、浸泡时间 15 min 和料液比 1:15 不变,浸泡温度对海带硬度、弹性及海带粉平均粒度 D_{50} 的影响见图4。随着温度的升高,海带硬度逐渐下降,海带粉的粒度则逐渐上升,海带硬度与海带粉的粒度呈负相关。温度升高, Na^+ 、 OH^- 与褐藻酸钙聚合物所发生的化学反应的效率增加,达到平衡状态时,随着化学反应的进行,硬度越小^[19]。但由于弹性增大,削弱了粉碎时的碰撞和挤压,使粉碎效果变差。综合粉碎效果和方便

经济原则,反应温度选择 25 ℃。

2.2 响应面结果

2.2.1 Box-Behnken 试验设计与结果 综合单因素试验结果,根据 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理^[20],选取 NaOH 质量分数 (X_1)、浸泡时间 (X_2)、浸泡液体积与海带质量比 (X_3) 为响应因素,海带粉平均粒度 D_{50} 为响应值,设计三因素三水平的响应面^[21]试验。试验因素水平表和试验结果见表1、表2。

2.2.2 模型方程的建立及显著性分析 利用 Design-Expert8.0.5 软件对试验数据进行回归拟合,得到的数学模型为

$$Y = 344.26 + 11.66X_1 + 7.16X_2 - 6.23X_3 + 9.67X_1X_2 + 5.60X_1X_3 + 20.65X_2X_3 + 40.91X_1^2 + 15.06X_2^2 + 7.08X_3^2$$

对模型进行方差分析,结果见表3。模型不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$),说明回归方程描述各因子与响应值之间的关系时,应变量与自变量之间的线性关系是显著的,即试验方法可靠;失拟项不显著 ($P > 0.05$),

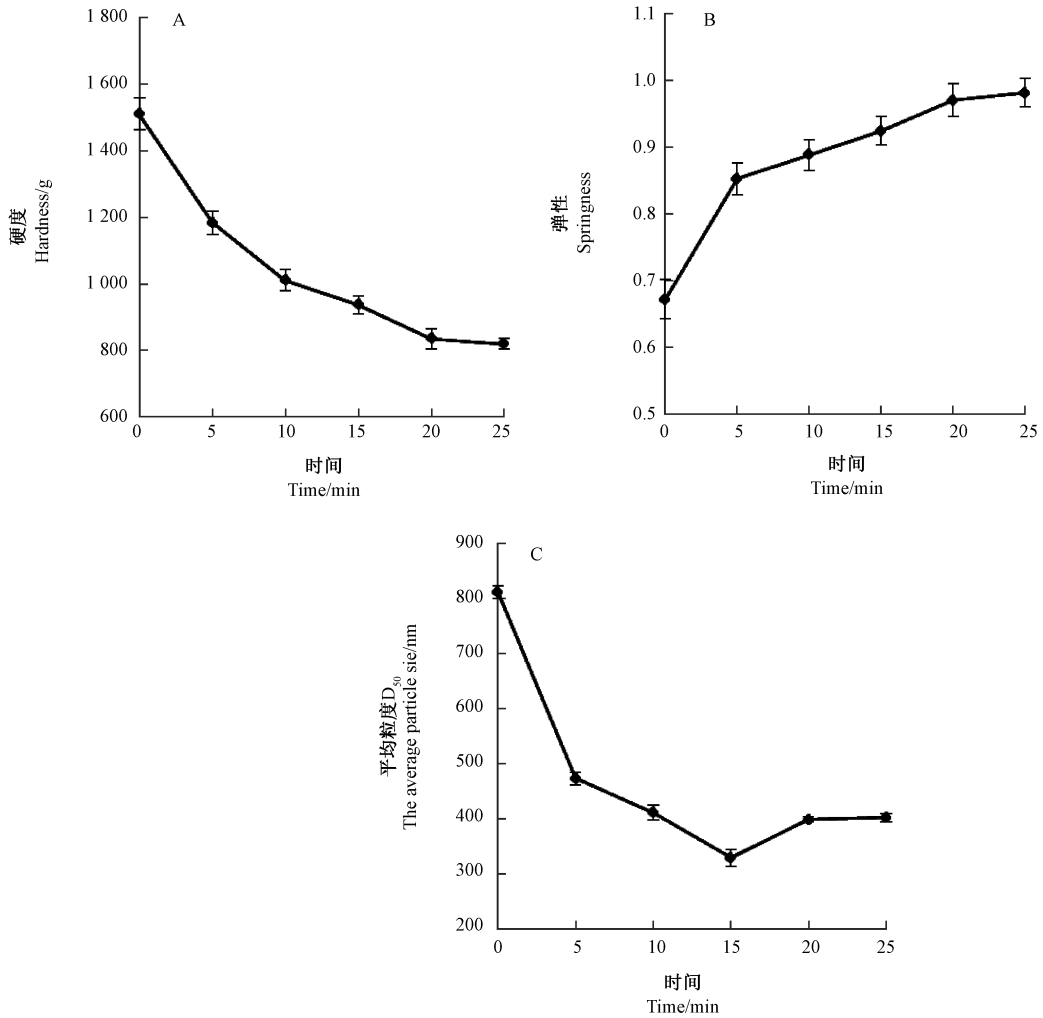


图 2 浸泡时间对硬度、弹性和平均粒度的影响

Fig. 2 Effect of steeping time on the hardness, springiness and the average particle size

表 1 响应面分析因素水平试验设计

Table 1 Experiment design of three factors and three levels of RSM

编码值 Coded value	NaOH 质量分数 X_1 Mass fraction of NaOH/%	浸泡时间 X_2 Soaking time/min	体积质量比 X_3 Volume to mass ratio/($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)
-1	0.15	10	10
0	0.20	15	15
+1	0.25	20	20

说明本试验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测。模型的 R^2 为 96.79%，说明使用该方程模拟真实的三因素三水平的分析可行。变异系数为 2.08%，说明试验具有良好的稳定性。

对回归方程模型因变量进行方差分析发现，模型一次项 X_1 差异极显著 ($P < 0.01$)， X_2 差异显著 ($P <$

0.05)， X_3 差异不显著 ($P = 0.0579$)。交互项 X_1X_2 差异显著； X_1X_3 的 $P = 0.1927$ ，表明两因素间差异不显著； X_2X_3 的 $P < 0.01$ ，表明两因素间差异极显著。二次项 X_1^2 ， X_2^2 差异极显著 ($P < 0.01$)， X_3^2 差异不显著 ($P = 0.1037$)。表明 NaOH 浓度、浸泡时间对海带粉平均粒径的主效应明显，且在 NaOH 质量分数、浸泡时

表 2 响应面分析方案及试验结果
Table 2 Experiment design and results of response surface methodology

试验号 Number	NaOH 质量分数 X_1 Mass fraction of NaOH/%	浸泡时间 X_2 Soaking time/min	体积质量比 X_3 Volume to mass ratio/($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	平均粒度 D_{50} The average particle size/nm
1	0	0	0	345.2
2	0	0	0	342.1
3	0	1	1	394.0
4	-1	0	-1	392.1
5	-1	0	1	369.1
6	0	0	0	340.4
7	1	-1	0	401.4
8	1	0	-1	404.2
9	0	0	0	352.6
10	-1	-1	0	397.4
11	0	1	-1	365.8
12	-1	1	0	379.7
13	0	0	0	341.0
14	0	-1	-1	380.1
15	1	1	0	422.4
16	0	-1	1	325.7
17	1	0	1	403.6

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Analysis of variance for response surface quadratic model

系数来源 Source of coefficient	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
模型	12 750.63	9	1 416.74	23.46	0.0002	极显著
X_1	1 088.11	1	1 088.11	18.02	0.0038	极显著
X_2	410.41	1	410.41	6.80	0.0351	显著
X_3	310.00	1	310.00	5.13	0.0579	
X_1X_2	374.42	1	374.42	6.20	0.0416	显著
X_1X_3	125.44	1	125.44	2.08	0.1927	
X_2X_3	1 705.69	1	1 705.69	28.24	0.0011	极显著
X_1^2	7 045.99	1	7 045.99	116.66	< 0.0001	极显著
X_2^2	954.65	1	954.65	15.81	0.0054	极显著
X_3^2	211.21	1	211.21	3.50	0.1037	
残差 Residual	422.79	7	60.40			
失拟项 Lack of fit	322.16	3	107.39	4.27	0.0974	
误差 Error	100.63	4	25.16			
总和 Total	13 173.42	16				
R^2	0.9679					
变异系数 Coefficient of variation/%	2.08					

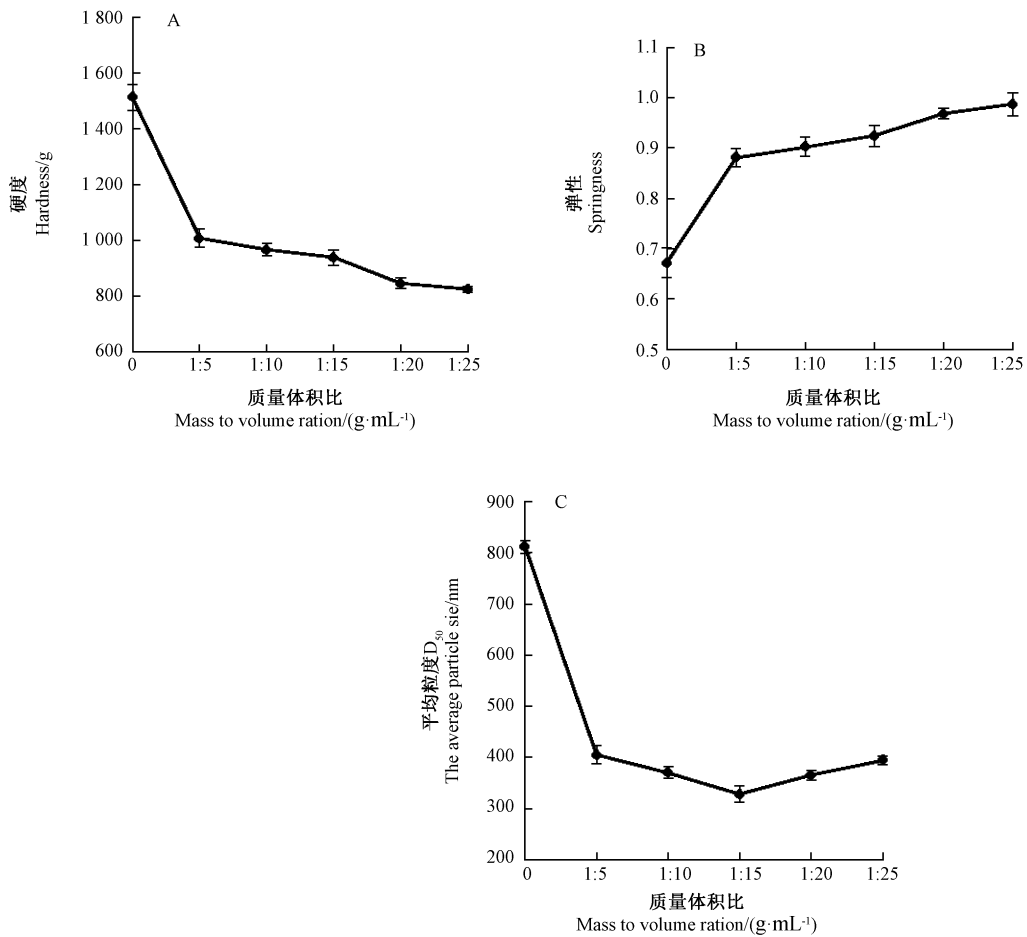


图3 海带质量与浸泡液体积比对硬度、弹性和平均粒度的影响

Fig. 3 Effect of material mass to liquid volume ratio on the hardness, springiness and the average particle size

间之间和浸泡时间、体积质量比之间存在交互作用。依据回归方程系数值 $X_1 = 11.66$, $X_2 = 7.16$, $X_3 = -6.23$ 可知,因素的主效应关系为:NaOH 质量分数 > 浸泡时间 > 体积质量比。

2.2.3 响应面分析 选取交互作用显著的情况进行响应曲面分析。响应面可直接反映出各因子对响应值的影响大小。

固定体积质量比 ($11.50\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$), NaOH 质量分数和浸泡时间及两者的交互作用对海带粉平均粒度影响的等高线及对应响应面见图 5。时间不变,海带粉平均粒度随 NaOH 质量分数的增加先逐渐降低然后上升;NaOH 质量分数不变,海带粉平均粒度同样呈现先降低后上升趋势。这与单因素试验分析的结果吻合,表明海带的硬度达到一定程度时,增加 NaOH 质量分数和延长浸泡时间,虽然硬度下降但平均粒度反而上升。

固定 NaOH 质量分数 (0.20%), 浸泡时间和体积质量比及两者的交互作用对海带粉平均粒度影响的等

高线及对应响应面见图 6。时间不变,海带粉平均粒度随体积质量比的增加逐渐降低;体积质量比不变,海带粉平均粒度随时间的延长先降低后缓慢上升。这与单因素试验分析的结果吻合。

2.2.4 最佳工艺优化验证 通过软件分析、计算,海带粉平均粒度最小预测值为 331.8 nm,此时各因素取值分别为 NaOH 质量分数 0.19%, 浸泡时间 10.55 min, 体积质量比 $20.00\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。为便于实际操作,将浸泡时间修正为 11 min,其他条件不变,进行验证试验,重复 3 次,海带粉 D_{50} 平均值为 $328.7 \pm 5.07\text{nm}$,两者相对偏差小于 1%。图 7 表明,在上述条件下,海带粉的粉碎效果佳,海带粉粒度分布范围窄,集中在 300 ~ 600 nm, D_{95} 为 825.5 nm,即 95% 以上海带颗粒粒度不超过 825.5 nm。

2.3 超微海带粉物理特性

由表 4 可知, C 粉与 A、B 粉相比,休止角、滑角、溶解性显著提高,膨胀力、持水力、润湿性明显下降。

表4 海带粉物理特性

Table 4 The physical properties of kelp powders

类别 Classification	休止角 Angle of repose/°	滑角 Slip angle/°	润湿时间 Wetting time/s	水溶性 Water solubility/%	膨胀力 Expansion force/%	持水力 Water-holding power/%
A粉 Powder A	30.4 ± 1.86c	35.0 ± 2.53c	13.5 ± 0.57c	11.4 ± 0.45c	2 208 ± 61a	5 460 ± 111a
B粉 Powder B	41.6 ± 1.01b	42.7 ± 1.80b	25.4 ± 1.00b	13.4 ± 0.55b	1 782 ± 65b	4 378 ± 107b
C粉 Powder C	62.5 ± 1.11a	70.6 ± 1.70a	35.3 ± 1.15a	20.1 ± 0.49a	1 266 ± 45c	3 197 ± 96c

注: 不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level.

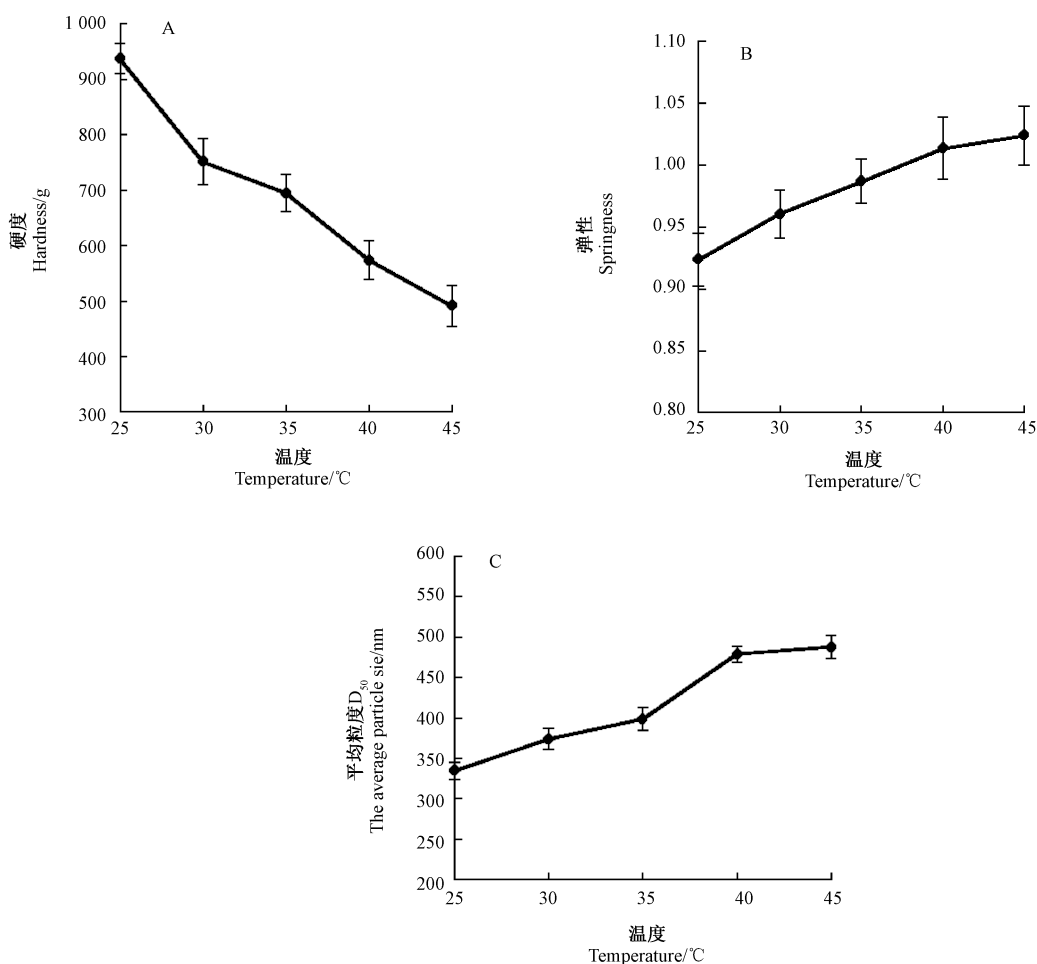


图4 浸泡温度对硬度、弹性和平均粒度的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the hardness, springiness and the average particle size

3 讨论

超微粉碎在食品工业中发展迅速,采用各种方法

优化制备条件,制得粒度分布集中、理化特性良好的粉体已成为研究的热点。杨丰云等^[22]采用响应面分析法以蛋白质得率为响应值对湿法超微粉碎提取地龙蛋白条件进行了优化。左永慧等^[23]以红枣膳食纤维为

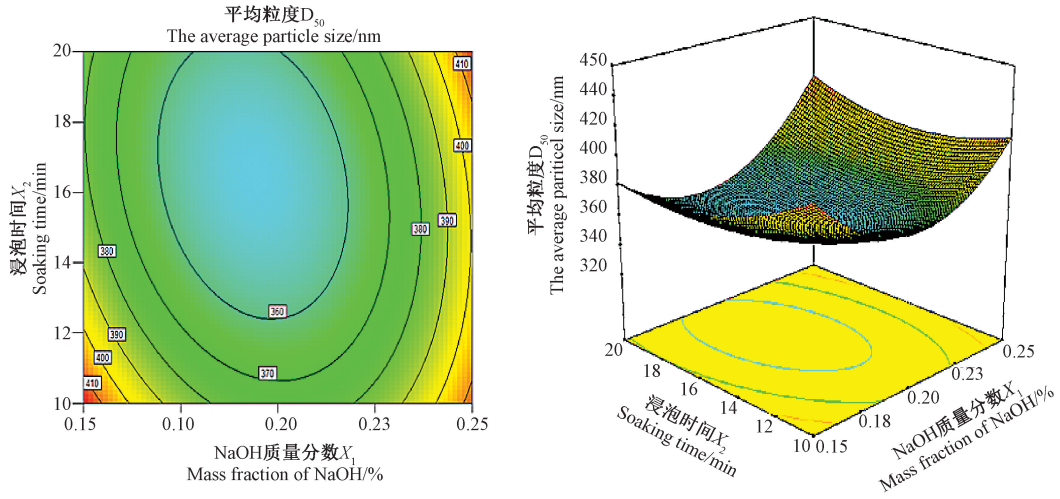


图 5 NaOH 质量分数和浸泡时间对平均粒度的影响

Fig. 5 Contour plot and response surface plot of the effect of NaOH mass fraction and soaking time on the average particle size

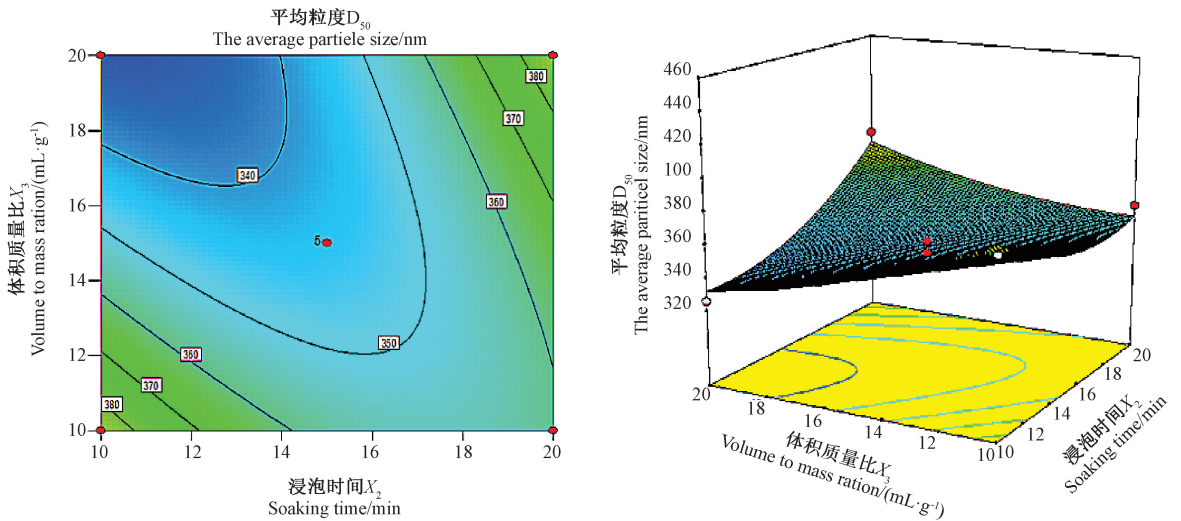


图 6 浸泡时间与体积质量比对平均粒度的影响

Fig. 6 Contour plot and response surface plot of the effect of soaking time and liquid volume to material mass ratio on the average particle size

原料进行超微粉碎,在单因素的基础上,通过响应面优化法确定了超微粉碎红枣膳食纤维粉的最佳工艺条件参数,使红枣膳食纤维粉的平均粒径达到 $16.59 \mu\text{m}$ 。这与本研究的优化方法和优化目的一致。

粉体粒径减小,颗粒聚集更加紧密^[24],颗粒与平滑玻璃板之间的最大静摩擦力增大致使休止角和滑角增大。在超微粉碎过程中,海带所受外力使细胞壁破裂,部分不溶性成分发生链断裂现象使亚微米级粉水

溶性大大提高,同时导致膨胀力和持水力下降,但相对于其他食品,其仍具有较高的膨胀力和持水力^[25-26]。

海带粉随着粒度的减小,休止角、滑角、溶解性显著提高,膨胀力、持水力明显下降,这与卜凡群^[14]的研究结果大体一致。而润湿性变化与其研究结果呈相反趋势,这是由于本研究所得亚微米级海带粉因凝聚和吸附性能增强,颗粒间相互聚集的强烈倾向,延长了润湿时间,降低了润湿性。张娥珍等^[27]比较了铁皮石斛

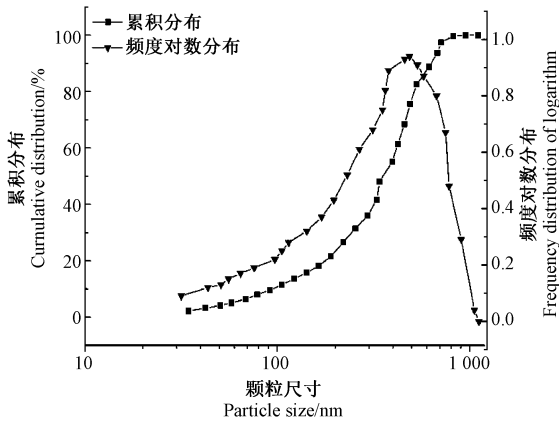


图7 海带粉粒度的累积分布及频度对数分布

Fig.7 Cumulative distribution and the logarithm frequency of kelp powder particle size

普通粉(约 100 μm)和超微粉(10 ~ 25 μm)的物理特性,发现超微粉在休止角、滑角、膨胀力、持水性、溶解性等方面都比普通粉表现好,这与本研究的结果基本一致,但由于粉体粒径大小及原料的不同,膨胀力、持水性变化呈相反趋势。粒度为 10 ~ 25 μm 的铁皮石斛粉与 100 μm 左右的粉体相比,亲水性基团及大分子物质暴露,比表面积增大,分子间交联形成网络空间结构,束缚水的能力增大,从而使膨胀力、持水力增加^[28]。由于细胞大小的差异^[29]和细胞组成物质的不同,10 ~ 20 μm 的海带粉膨胀力、持水力较粒度 270 ~ 500 μm 的粉体有所下降,亲水性物质的暴露在一定程度上增加了粉体的膨胀力、持水力,而粉碎过程中施加的挤压、剪切作用使得膳食纤维等物质发生部分断裂,尤其是水溶性膳食纤维长链裂成短链,束缚水的能力明显下降^[30]。

休止角、滑角和水溶性的提高表明亚微米级海带粉生产有重大意义。休止角、滑角是表示粉体流动性的重要指标,对粉体凝聚性和吸附性能具有参考意义。凝聚性和吸附性能的增强有助于提高产品质量的稳定性,如在海带面包的加工和食用过程中,海带粉不易从面包上脱落,也不会咀嚼时产生颗粒感^[31]。水溶性的大小可以用来衡量水溶性营养物质的释放程度。水溶性的增加可改善产品的加工性能,如用超微海带粉制备海带饮料可增加其中 B 族维生素、有机碘等海带活性成分含量,提高人体吸收利用率^[32]。

4 结论

本研所得海带粉粒度分布范围窄,集中在 300

~ 600 nm 之间, $D_{95} = 825.5$ nm, 即 95% 以上海带颗粒粒度不超过 825.5 nm, 破壁率达到 95% 以上, 克服了水清洗后直接粉碎平均粒度为 $D_{50} = 811.7$ nm, 仅有 55% 左右颗粒小于 1 μm 的缺陷。此外生产周期也从 18 h 降低到 11 min, 降低生产成本的同时改善了海带粉物理特性。

亚微米级海带粉休止角为 62.5°、滑角为 70.6°、水溶性为 20.1%, 与市售超微粉碎海带粉相比, 休止角增加 20.9°, 滑角增加 27.9°, 水溶性增加 50.0%。亚微米级超微海带粉在溶解性、流动性等主要物理指标方面优于市售超微粉碎海带粉, 为海带精深加工提供了基础。在实际生产中, 可按需求选择粒径大小合适的海带粉。

参考文献:

- [1] 叶盛英, 李红. 海带药用研究进展[J]. 天津药学, 2003, 15(6): 58-62
- [2] 周杰, 陈安国. 海藻多糖的生物活性研究进展[J]. 饲料工业, 2005, 26(18): 12-15
- [3] 孔鹏, 姚翠鸾, 齐丽薇, 齐向楠, 苏亚南, 蒋继志. 海带多糖的抗衰老作用及其机理的研究[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(4): 63-66
- [4] 谭雯文, 秦宇. 海带多糖生物活性的研究进展[J]. 广西轻工业, 2009, 25(7): 5-7
- [5] Robson L S, Jose M B. Seaweed meal as a protein source for the white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Applied Phycology, 2009, 21(2): 193-197
- [6] 向智男, 宁正祥. 超微粉碎技术及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(2): 88-102
- [7] 高虹, 史德芳, 何建军, 王少华, 周明, 张琪. 超微粉碎对香菇柄功能成分和特性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 40-43
- [8] Mamat H, Matanjun P, Lbrahim S, Amin S F, Hamid M A, Rameli A S. The effect of seaweed composite flour on the textural properties of dough and bread [J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(2): 1057-1062
- [9] 江建梅, 徐永庆, 叶宏涛, 乔长晟, 贾士儒. 保健型海带粉的生产工艺[J]. 山东食品发酵, 2009, 3(154): 32-34
- [10] 曹新志, 韩珍珠, 刘文年. 超细海带粉的生产工艺[J]. 粮油食品科技, 2000, 8(6): 28-29
- [11] 杨官品, 李晓捷, 丛义周, 曲善村, 李志凌, 张壮志, 罗世菊. 海带配子体无性繁殖(克隆)技术研究与应用进展[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 569-572
- [12] Wang X L, Liu C L, Li X J, Gong Y Z, Duan D L. Assessment of genetic diversities of selected *Laminaria* (*Laminariales*, *Phaeophyta*) gametophytes by inter-simple sequence repeat analysis [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(6): 753-758
- [13] 轻工业部日用化学工业科学研究所. GB/T 11986-1989 表面活性剂、粉体和颗粒休止角的测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006

- [14] 卜凡群. 海带超微粉加工技术及其理化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010
- [15] Jumah R Y, Tashtoush B, Shaker R R, Zrainy A F. Manufacturing parameters and quality characteristic of spray dried jameed [J]. *Drying Technology*, 2000, 18(4/5): 967-984
- [16] 郑慧, 王敏, 吴丹. 超微处理对苦荞麸理化及功能特性影响的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2006, 32(8): 4-9
- [17] 孙秀菊. 海带的不同软化方法及其对碘的影响[J]. *中国食物与营养*, 2010, (6): 28-32
- [18] 沈开惠, 于福增. 海带脯的研制[J]. *食品工业*, 2000, (2): 44
- [19] 张全胜, 唐学玺, 张培玉, 曲善村, 李晓捷. 海带配子体克隆育苗生产中采苗技术的研究[J]. *高技术通讯*, 2005, 15(1): 89-92
- [20] Agil R, Oomah D B, Mazza G, Hosseinian F. Optimization of alkylresorcinols extraction from triticale bran using response surface methodology [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(7): 2655-2664
- [21] Kahraman F. The use of response surface methodology for prediction and analysis of surface roughness of AISI4140 steel [J]. *Material and Technology*, 2009, 43(5): 267-270
- [22] 杨丰云, 付廷明, 郭立玮, 刘峰, 张伟. 响应面分析法优化湿法超微粉碎地龙蛋白的提取工艺[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2012, 18(10): 33-37
- [23] 左永慧, 纵伟, 张康逸, 董宇, 赵光远. 响应面优化红枣膳食纤维的超微粉碎工艺[J]. *食品科技*, 2015, 40(7): 81-85
- [24] 李壮, 朱德明, 李积华, 林丽静, 黄晓兵, 朱怡婷. 振动超微粉碎对毛竹笋干物化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 259-263
- [25] 张炳文, 郝征红, 李允祥, 岳凤丽. 海带超细粉理化特性的研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(8): 43-45
- [26] Wang T, Sun X H, Zhou Z X, Chen G B. Effects of micro fluidization process on physicochemical properties of wheat bran [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 742-747
- [27] 张娥珍, 崔素芬, 辛明, 何全光. 铁皮石斛超微粉与普通粉物理特性的比较[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(7): 1444-1449
- [28] 刘霞, 李华, 杨继红, 柴佳, 王华. 冷榨葡萄籽饼超微粉中主要营养物质的分析[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(1): 117-128
- [29] 黎明, 苏金乐, 武荣花, 杨芳绒, 赵桂枝, 翟翠娟. 铁皮石斛营养器官的解剖学研究[J]. *河南农业大学学报*, 2001, 35(2): 125-129
- [30] 李健, 马玉芳, 俞道进, 黄小红, 姚金水, 黄一帆. 鱼腥草超微粉的显微特性[J]. *福建农林大学学报*, 2011, 40(4): 392-395
- [31] 宋莲军, 刘传云, 柳艳霞, 高向阳. 海带粉的加工及其在面包中的应用[J]. *粮食与饲料工业*, 2005, (8): 18-19
- [32] 李春华, 高海生, 李凤英. 海带豆腐的研制[J]. *中国食品学报*, 2004, 4(3): 44-47

Study on the Preparation and Physical Properties Analysis of Submicron Kelp Powder

FAN Lin LOU Yongjiang CHEN Xiaofang SUN Peixuan
(School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211)

Abstract: To obtain submicron kelp powder with better physical properties and more concentrated particle size distribution, pretreatment was carried out with NaOH to shorten the time and wet grinding was used to reduce the particle size. The single-factor experiments and response surface method (RSM) were employed to optimize the technological conditions including the soaking liquid concentration, ratio of material to solvent and steeping time. The optimal conditions were set as NaOH mass fraction of 0.19%, soaking time of 11.00 min, and liquid-solid ratio of 20.00 mL·g⁻¹. Under these conditions, the average particle size of kelp powder was 328.7 nm, D95 was 825.5 nm and the maximum particle size was 1106.2 nm, angle of repose was 62.5°, slip angle was 70.6°, water solubility was 20.1%, wetting time was 35.3 s, expansion force was 1266%, and water-holding power was 3197%. Compared with ultrafine kelp powder from market, the properties of nanoscale kelp powder were improved greatly with the angle of repose increased by 20.9°, slip angle increased by 27.9°, and water solubility increased by 50.0%. At the same time, the kelp powder physical properties were enhanced and improved which provides the basis for deep processing of kelp.

Keywords: submicron kelp powder, angle of repose, slip angle, water solubility