

米糠油体的酶法提取工艺优化

吕雯雯¹, 高倩茹¹, 郝佳¹, 闫秋丽², 许朵霞¹

(1. 北京工商大学食品与健康学院, 北京食品营养与健康高精尖创新中心, 北京市食品添加剂工程技术研究中心, 食品添加剂与配料北京高校工程研究中心, 北京市食品风味化学重点实验室, 食品质量与安全北京实验室, 北京 100048; 2. 北京市经济管理学校, 北京 100048)

摘要:米糠油体作为天然水包油型乳状液, 在食品工业中具有良好的应用前景。为提高米糠油体得率及稳定性, 采用酶法提取米糠中油体, 以米糠油体得率、粒径分布、稳定性及微观结构为指标, 考察了木聚糖酶与植物提取酶质量比、复合酶添加量、pH 和酶解时间对米糠油体提取的影响。结果表明, 米糠油体最优提取条件为木聚糖酶与植物提取酶质量比 2:1、复合酶添加量 3%、pH 5.0、酶解温度 50℃、酶解时间 1.5 h, 在此条件下提取的米糠油体得率高, 粒径分布集中, 粒径达到微米级, 且稳定性良好、结构完整。

关键词:米糠油体; 酶法; 工艺优化; 稳定性

中图分类号:TS222+.1; TS224 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2022)08-0025-07

Optimization of enzymatic extraction of rice bran oleosome

LYU Wenwen¹, GAO Qianru¹, HAO Jia¹, YAN Qiuli², XU Duoxia¹

(1. Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry, Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives and Ingredients, Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives, Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, College of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Economic Management School, Beijing 100048, China)

Abstract: Rice bran oleosome, as a natural oil-in-water emulsion, has a good application prospect in food industry. In order to improve the yield and stability of rice bran oleosome, the enzymatic extraction method was used to extract oleosome from rice bran. With yield, size distribution, stability and microstructure of rice bran oleosome as indexes, the effects of mass ratio of xylanase to plant extracted enzyme, dosage of complex enzyme, pH and enzymatic hydrolysis time on the extraction of rice bran oleosome were investigated. The results showed that the optimal enzymatic extraction conditions of rice bran oleosome were obtained as follows: mass ratio of xylanase to plant extracted enzyme 2:1, dosage of complex enzyme 3%, pH 5.0, enzymatic hydrolysis temperature 50℃, enzymatic hydrolysis time 1.5 h. Under these conditions, rice bran oleosome obtained had high yield, concentrated size distribution, micron level particle size, good stability and integrate structure.

Key words: rice bran oleosome; enzymatic method; process optimization; stability

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072216)

作者简介: 吕雯雯(1997), 女, 博士研究生, 研究方向为功能因子稳态化(E-mail) 18811317024@163.com。

通信作者: 许朵霞, 教授, 博士(E-mail) xuduoxia@th.btbu.edu.cn。

随着人们对绿色、安全食品的追求, 使用天然食品原料已成为未来食品产业的发展趋势。米糠是稻米加工过程中的主要副产品, 含有稻米中 2/3 的营养成分和 9/10 的人体必需元素, 有“天然营养宝库”的称号^[1]。米糠中含有 15% 的蛋白质、16% ~ 22% 的脂肪、10% 的水分, 还含有生育酚、谷维素、角

鲨烯等活性物质,具有增强免疫力、治疗肥胖症、预防心血管疾病甚至抗癌的作用^[2-4]。我国米糠产量丰富,但存在深加工不足的问题,造成了米糠资源的浪费。

植物油体是天然的微纳米级原料,富含多不饱和脂肪酸、磷脂、生育酚和植物甾醇等生物活性物质,作为天然复合物乳状液,可广泛应用于饮料、乳制品、巧克力和冰淇淋等食品中^[5-7]。此外,植物油体为天然乳化剂,作为载体具有良好的输送和释放能力,有利于食品的低能耗生产^[8-10]。从米糠中提取米糠油体作为天然乳化剂应用于食品工业中,具有广泛的应用前景,可解决米糠深加工不足的问题。

目前,植物油体的提取方法主要有水法和酶法^[11-12]。水法提取效率通常较低;而酶法提取可以解决此问题,如 Kapchie 等^[13]利用酶法提取大豆油体,选用复合果胶酶、纤维素酶和 β -葡聚糖酶,在60℃、150 r/min 条件下处理大豆粉 20 h,大豆油体的提取率显著高于水法提取的。目前国内外对于米糠油体的研究不多,且主要是对传统水法提取的米糠油体成分和物理性质的研究。

米糠中含有较多的半纤维素,其中木聚糖含量最高。木聚糖酶可以分解米糠细胞壁及米糠中的木聚糖^[14-15]。植物提取酶中包括纤维素酶、半纤维素酶、 β -葡聚糖酶和果胶酶,可以显著破坏植物细胞壁^[16]。因此,本文拟采用木聚糖酶及植物提取酶针对性地提取米糠油体,以油体得率、粒径分布、稳定性及微观结构为指标,探究复合酶配比、复合酶添加量、pH 及酶解时间对米糠油体提取的影响,优化酶法提取米糠油体的工艺条件,为米糠油体的开发与应用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

米糠,哈尔滨北大荒米业有限公司。植物提取酶(主要包含纤维素酶、果胶酶、 β -葡聚糖酶,纯度 $\geq 99\%$),宁夏和氏璧生物有限公司;木聚糖酶(纯度 $\geq 99\%$)、尼罗蓝(纯度 $\geq 98\%$)、尼罗红(纯度 $\geq 98\%$),上海源叶生物科技有限公司;叠氮化钠,分析纯,美国 Sigma 公司;氢氧化钠、盐酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,河南省予华仪器有限公司;Allegra X-15R 超高速离心机,美国贝克曼库尔特有限公司;S3500 粒度仪,美国

Microtrac 公司;Lumisizer 稳定性分析仪,德国 L. U. M. GmbH 公司;Eutech 700 pH 计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;FV3000 激光共聚焦显微镜,美国 Olympus 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米糠油体的制备

将过 450 μm (40 目)筛的米糠以料液比 1:6(质量比)加入到 1 mmol/L 的磷酸盐缓冲液中,调节 pH,加入复合酶搅拌均匀,50℃下酶解一定时间后,4 500 r/min、23℃离心 20 min,取上层,即为米糠油体,在米糠油体中加入 0.01% 的叠氮化钠防止微生物生长。按下式计算米糠油体得率(x)。

$$x = m_1/m_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为米糠油体质量,g; m_2 为米糠质量,g。

1.2.2 米糠油体粒径分布的测定

采用 S3500 粒度仪测定米糠油体的粒径分布。取一定量样品,用 1 mmol/L 磷酸缓冲液稀释 400 倍,以水为介质,连续相和分散相的折射率分别设为 1.33 和 1.45,湿法测量。

1.2.3 米糠油体稳定性分析

使用 Lumisizer 稳定性分析仪测定米糠油体的稳定性。取 0.4 mL 样品,在转速 4 000 r/min、测试温度 25℃、扫描间隔 60 s/次、扫描次数 255 次条件下,测定样品的移动速率。

1.2.4 米糠油体微观结构分析

采用 FV3000 激光共聚焦显微镜分析米糠油体微观结构。在米糠油体中加入油体质量的 0.02% 尼罗红对油相进行染色,取少量染色样品置于载玻片上,用 60 倍目镜进行观察,调节激发波长为 488 nm 和 635 nm。

1.2.5 米糠油体中脂肪和蛋白质含量的测定

采用索氏抽提法测定米糠油体脂肪含量;采用 BCA 法测定米糠油体蛋白质含量。

1.2.6 数据分析

数据采用 Excel 2017 及 SPSS 17.0 软件进行统计分析,用 OriginPro 8.5.1 进行绘图,实验重复 3 次,结果以“平均值 \pm 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 复合酶比对米糠油体得率和性质的影响

在复合酶添加量为 2%、pH 为 5.0、酶解温度为 50℃、酶解时间为 1.5 h 条件下,调整复合酶配比(木聚糖酶与植物提取酶质量比,下同)分别为 1:3、1:2、1:1、2:1、3:1,从米糠油体得率、粒径分布、稳定性与微观结构方面研究复合酶比对米糠油体制备的影响。

2.1.1 得率

复合酶配比对米糠油体得率的影响见图1。从图1可以看出,随着木聚糖酶所占比例的增大,米糠油体得率呈现先增大后减小的趋势,复合酶配比为2:1时,米糠油体得率最大,为73.6%。可能是因为米糠中含有较多的木聚糖,当木聚糖酶占比增加时,米糠中的木聚糖被充分酶解,米糠油体释放增加;但当木聚糖酶占比再增加,则植物提取酶占比过少,无法充分破坏细胞壁,导致米糠油体释放减少,得率降低。

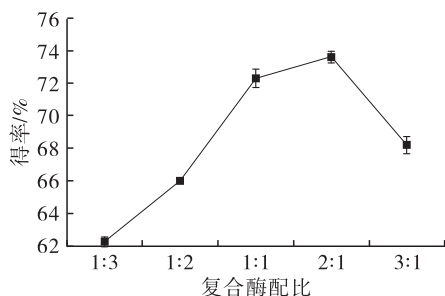


图1 复合酶配比对米糠油体得率的影响

2.1.2 粒径分布及稳定性

复合酶配比对米糠油体粒径分布的影响见图2。

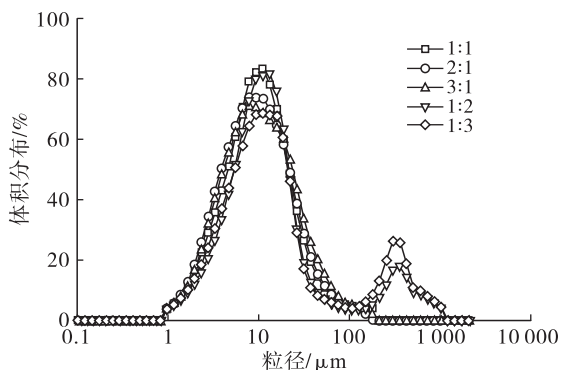


图2 复合酶配比对米糠油体粒径分布的影响

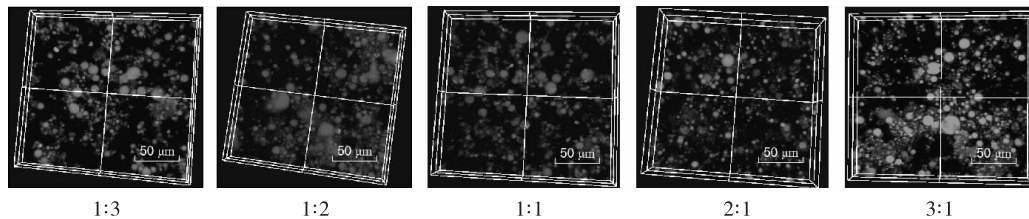


图4 复合酶配比对米糠油体微观结构的影响

综上,米糠油体提取的最佳复合酶配比为2:1。

2.2 复合酶添加量对米糠油体得率和性质的影响

在复合酶配比为2:1、pH为5.0、酶解温度为50℃、酶解时间为1.5 h条件下,调整复合酶添加量分别为1%、2%、3%、4%、5% (以体系质量计),从米糠油体得率、粒径分布、稳定性与微观结构方面研究复合酶添加量对米糠油体制备的影响。

由图2可看出,当复合酶配比为1:3和1:2时,米糠油体粒径呈双峰分布,且粒径较大,可能是由于油体液滴聚结所致。随着木聚糖酶所占比例的增大,油体粒径呈单峰分布,表现出均一性。复合酶配比为2:1时,液滴粒径最小,为8.37 μm,在该条件下提取的米糠油体液滴均匀性最佳。

复合酶配比对米糠油体稳定性的影响见图3。移动速率值越小,样品体系越稳定^[17]。由图3可看出,随木聚糖酶所占比例的增大,米糠油体稳定性逐渐增大,复合酶配比为2:1时,米糠油体稳定性最高。此后,木聚糖酶占比再增大,米糠油体稳定性不再发生改变。因此,复合酶配比为2:1时,米糠油体粒径分布最均一,粒径最小且稳定性最好。

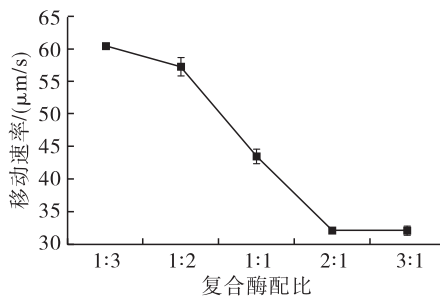


图3 复合酶配比对米糠油体稳定性的影响

2.1.3 微观结构

复合酶配比对米糠油体微观结构的影响见图4。由图4可看出,复合酶配比为1:3和1:2时,米糠油体凝结明显,大小分布不均匀,多形成大油滴。复合酶配比为1:1和2:1时,米糠油体聚集体粒径变小,油体呈现出相对稳定的状态。复合酶配比为3:1时,米糠油体粒径变大,由之前的聚结状态变为絮凝状态,导致油体失稳。

2.2.1 得率

复合酶添加量对米糠油体得率的影响见图5。从图5可以看出,随着复合酶添加量从1%增加到5%,米糠油体得率呈现先增加后降低的趋势,复合酶添加量为3%时,米糠油体得率最大,为79.5%。酶添加量增大,使得酶与底物的接触面积增大,从而使米糠细胞壁被充分破坏,释放出更多的油体^[18];

但酶的过度添加会导致油体完整性被破坏,降低米糠油体得率。

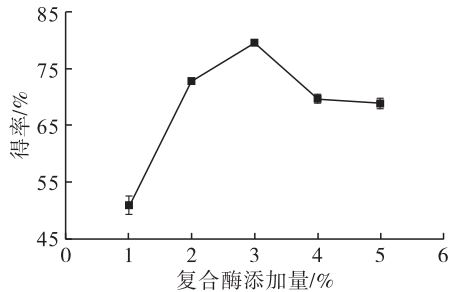


图5 复合酶添加量对米糠油体得率的影响

2.2.2 粒径分布及稳定性

复合酶添加量对米糠油体粒径分布的影响见图6。

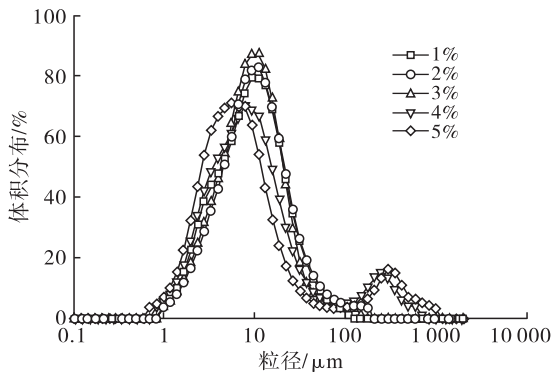


图6 复合酶添加量对米糠油体粒径分布的影响

从图6可以看出,复合酶添加量为1%~3%时,米糠油体粒径较小且均一,呈单峰分布,这可能是由于复合酶将细胞壁上部分多糖水解为单糖,适量的单糖可能在油体的油水界面上与蛋白质相互作用产生强烈的空间作用力,有效阻碍了油体间的聚结^[19]。同时,随着复合酶添加量的增加,米糠油体的粒径分布峰值向更小的尺寸移动,复合酶添加量为3%时,粒径最小。但是,复合酶添加量超过3%时,米糠油体粒径呈现双峰分布,粒径大小不

均一。

复合酶添加量对米糠油体稳定性的影响见图7。从图7可以看出,随着复合酶添加量的增加,米糠油体稳定性呈现先增加后降低的趋势。复合酶添加量为3%时,米糠油体稳定性最好,可能是由于该条件下米糠油体具有较小的粒径及较好的分散性。因此,复合酶添加量为3%时,米糠油体粒径分布最均一,粒径最小且稳定性最好。

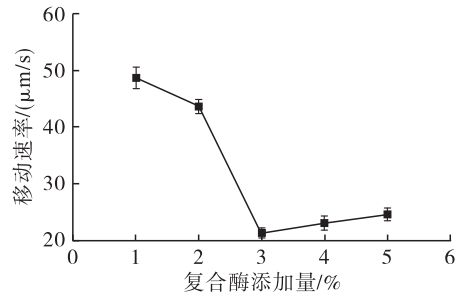


图7 复合酶添加量对米糠油体稳定性的影响

2.2.3 微观结构

复合酶添加量对米糠油体微观结构的影响见图8。从图8可以看出,复合酶添加量为1%时,米糠油体表现出明显的聚结,多形成大油滴,在宏观上表现为不稳定的状态,这可能是细胞壁没有被充分水解,体系中单糖含量少,不足以与界面膜上的蛋白质形成共聚物,导致油体液滴之间空间作用力弱,从而使液滴间发生聚结。当复合酶添加量增加至2%~3%时,油体分布均匀,粒径大小集中,宏观体系表现为稳定状态,主要是因为体系中单糖含量增加,可以与界面膜上的蛋白质充分作用,形成共聚物,使油体表面界面膜变厚,从而提高米糠油体稳定性^[20]。当复合酶添加量再增大时,米糠油体液滴出现絮凝现象,且形成较多不规则的大油滴,这可能是由于体系中单糖含量过多,出现损耗絮凝,导致米糠油体失稳。

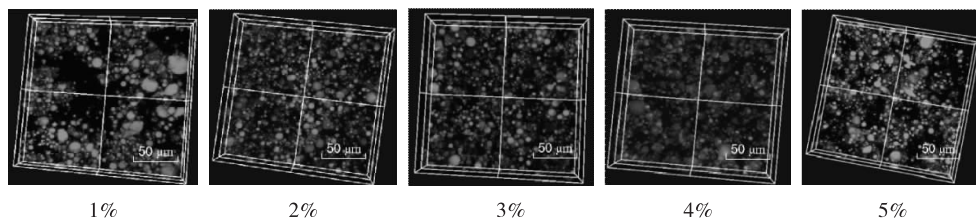


图8 复合酶添加量对米糠油体微观结构的影响

综上,米糠油体提取的最佳复合酶添加量为3%。

2.3 pH对米糠油体得率和性质的影响

在复合酶配比为2:1、复合酶添加量为2%、酶解温度为50℃、酶解时间为1.5 h条件下,调节pH分别为4.0、4.5、5.0、5.5、6.0,从米糠油体得率、粒

径分布、稳定性与微观结构方面研究pH对米糠油体制备的影响。

2.3.1 得率

pH对米糠油体得率的影响见图9。pH对于酶活性有显著性影响,未处于最适pH时,酶活性较

低。由于本研究中两种细胞壁多糖酶的最适 pH 不同,因此将其复配后,需要重新验证最适 pH。从图 9 可以看出,随着 pH 的增大,米糠油体得率呈现先增大后降低的趋势,pH 为 5.5 时,米糠油体得率最高,为 75.6%。

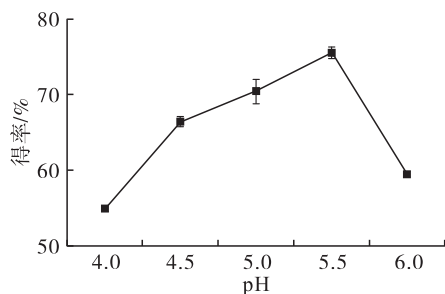


图 9 pH 对米糠油体得率的影响

2.3.2 粒径分布及稳定性

pH 对米糠油体粒径分布的影响见图 10。

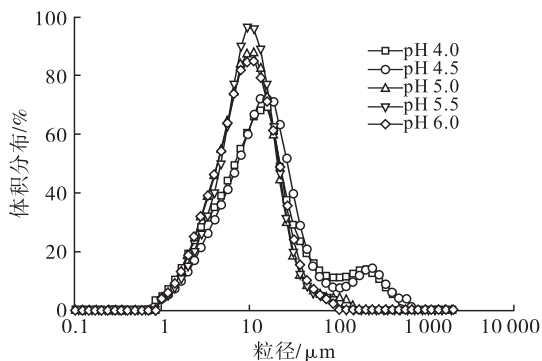


图 10 pH 对米糠油体粒径分布的影响

从图 10 可以看出,在 pH 4.0 和 pH 4.5 条件

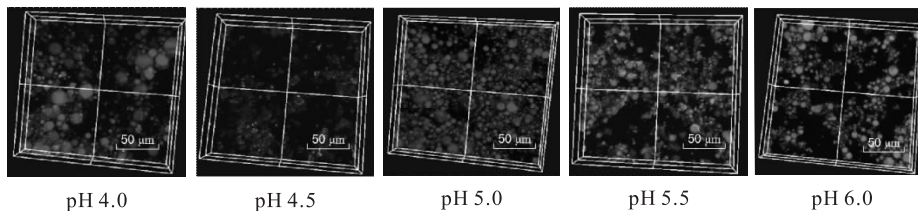


图 12 pH 对米糠油体微观结构的影响

综上,米糠油体提取的最佳 pH 为 5.0。

2.4 酶解时间对米糠油体得率和性质的影响

在复合酶配比为 2:1、复合酶添加量为 2%、pH 为 5.0、酶解温度为 50℃ 条件下,分别搅拌反应 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 h,从米糠油体得率、粒径分布、稳定性与微观结构方面研究酶解时间对米糠油体制备的影响。

2.4.1 得率

酶解时间对米糠油体得率的影响见图 13。从图 13 可以看出,随着酶解时间的延长,米糠油体得率呈现先增加后降低的趋势,酶解时间为 1.5 h 时,米糠油体得率最高。

下,米糠油体的粒径呈双峰分布,粒径分布不均,发生油体聚结,可能是由于米糠油体表面蛋白质等电点在 pH 4.0 左右,使得蛋白质沉淀,米糠油体失稳。pH 在 5.0~6.0 时,米糠油体粒径呈单峰分布,粒径分布均匀,主要集中在 8 μm 左右。

pH 对米糠油体稳定性的影响见图 11。从图 11 可以看出,pH 在 4.0~6.0 范围内,米糠油体的稳定性呈现先增高后降低的趋势,pH 为 5.0 时,米糠油体的稳定性最佳。因此,pH 为 5.0 时,米糠油体粒径分布最均一,粒径最小且稳定性最好。

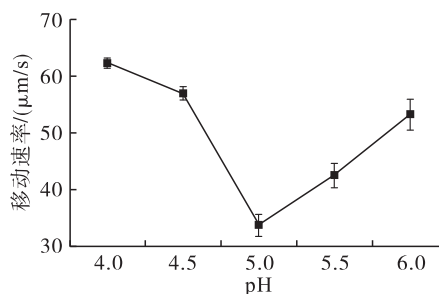


图 11 pH 对米糠油体稳定性的影响

2.3.3 微观结构

pH 对米糠油体微观结构的影响见图 12。从图 12 可以看出,pH 为 4.0 时,米糠油体聚结形成较多的大油滴,稳定性差,与粒径分布的结果一致。pH 增大到 5.0 时,米糠油体大小分布集中,分散均匀,呈现出稳定的状态。pH 在 5.5~6.0 范围内,米糠油体发生絮凝,逐渐失稳,主要是因为米糠油体空间相互作用力减弱。

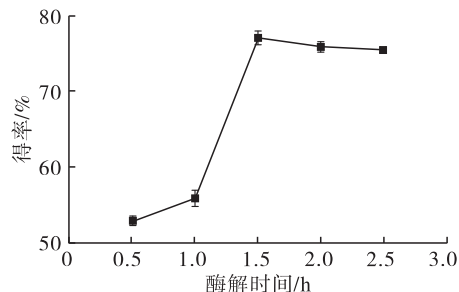


图 13 酶解时间对米糠油体得率的影响

2.4.2 粒径分布及稳定性

酶解时间对米糠油体粒径分布的影响见图 14。从图 14 可以看出,酶解时间在 0.5~2.0 h 时,米糠油体粒径呈单峰分布,酶解时间为 1.5 h 时,米糠油

体粒径分布最集中,酶解时间延长至 2.5 h 时,米糠油体粒径呈双峰分布,出现大的聚集体,可能是由于酶解时间的延长,油体的界面膜被破坏,油滴聚合导致。

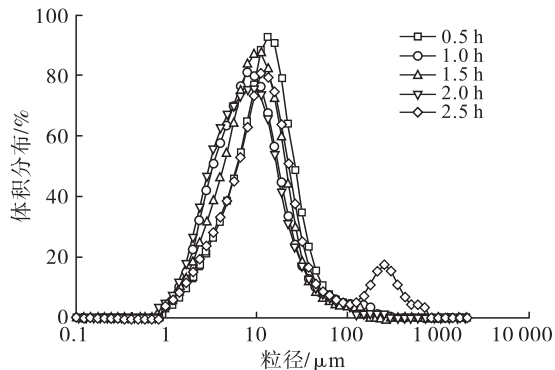


图 14 酶解时间对米糠油体粒径分布的影响

酶解时间对米糠油体稳定性的影响见图 15。从图 15 可以看出,随着酶解时间的延长,米糠油体稳定性呈现先增大后降低的趋势。酶解 0.5 ~ 1.0 h 时,米糠油体稳定性差,可能是由于酶解时间过短,酶解不充分,仅少量油体被释放出来,游离的少量油体空间作用力弱。酶解 1.5 h 时,米糠油体显示出较好的稳定性,可能是由于该条件下米糠酶解充分,大量油体被释放出来,油体间的空间作用力较

强^[21]。但随着酶解时间的继续延长,体系中的油滴发生聚结,体系失稳,从而导致稳定性变差。因此,酶解时间为 1.5 h 时,米糠油体粒径分布最均一,粒径最小且稳定性最好。

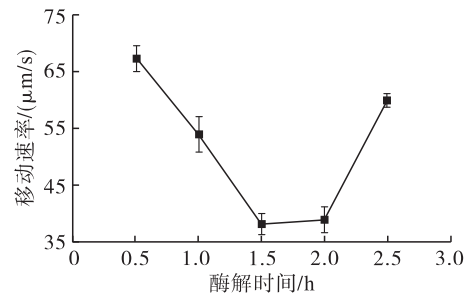


图 15 酶解时间对米糠油体稳定性的影响

2.4.3 微观结构

酶解时间对米糠油体微观结构的影响见图 16。从图 16 可以看出,酶解时间为 0.5 h 时,米糠油体粒径分布不均,有强烈的絮凝及聚结作用,表现为不稳定状态。当酶解时间延长至 1.5 h 时,米糠油体粒径逐渐变小,分布均匀,无明显的絮凝和聚结,稳定性良好。继续延长酶解时间,米糠油体又表现出不稳定状态,可能是酶解过度导致油体完整性被破坏。这与粒径及稳定性的结果一致。

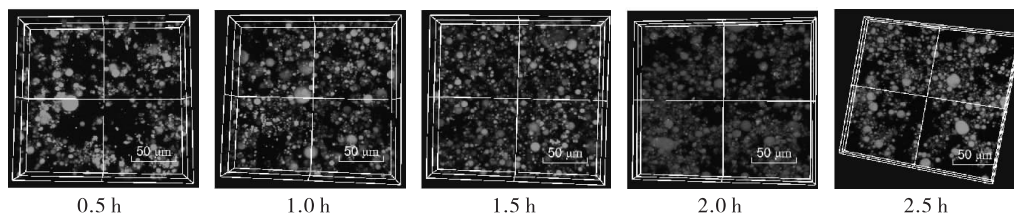


图 16 酶解时间对米糠油体微观结构的影响

综上,米糠油体提取的最佳酶解时间为 1.5 h。

2.5 米糠油体基本组成

在酶法提取米糠油体的最佳工艺条件(复合酶配比为 2:1,复合酶添加量为 3%,pH 为 5.0,酶解时间为 1.5 h,酶解温度为 50℃)下提取米糠油体,检测米糠油体的基本组成,可得干基条件下米糠油体中脂肪含量为(87.37 ± 0.16)%,蛋白质含量为(12.63 ± 0.14)%。

3 结论

选用木聚糖酶和植物提取酶,以油体得率、粒径分布、稳定性及微观结构为考察指标,对酶法提取米糠油体的条件(复合酶配比、复合酶添加量、pH、酶解时间)进行了优化。结果显示,在木聚糖酶与植物提取酶质量比 2:1、复合酶添加量 3%、pH 5.0、酶解温度 50℃ 和酶解时间 1.5 h 条件下提取米糠油体,所得米糠油体得率高,粒径分布集中,粒径达到微米级,且酶法提取不会破坏米糠油体表面蛋白质,得

到的米糠油体稳定性良好、结构完整。本研究为米糠油体的开发与应用提供一定的理论基础,对于提高油体稳定性和拓宽油体在食品领域的应用有重要意义。

参考文献:

- [1] GUL K, YOUSUF B, SINGH A K, et al. Rice bran: nutritional values and its emerging potential for development of functional food: a review [J]. *Bioact Carbohydr Diet Fibre*, 2015, 6(1): 24-30.
- [2] 闫子鹏, 薛锦峰, 程凤彬, 等. 米糠油制取工艺关键技术研究进展 [J]. *粮食与食品工业*, 2014, 21(1): 4-6.
- [3] PUNIA S, KUMAR M, SANDHU K S, et al. Rice-bran oil: an emerging source of functional oil [J]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(4): 15318-15331.
- [4] MOST M M, TULLEY R, MORALES S, et al. Rice bran oil, not fiber, lowers cholesterol in humans [J]. *Am J Clin Nutr*, 2005, 81(1): 64-68.

(下转第 56 页)

中塑化剂含量降至标准要求范围内,且较好地实现了对维生素 E 和甾醇的保留。

参考文献:

- [1] 管伟举,陈钊,谷克仁. 核桃油研究进展[J]. 粮食与油脂, 2010(5): 39-41.
- [2] 杨永涛,潘思源,靳欣欣,等. 不同品种核桃的氨基酸营养价值评价[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 207-212.
- [3] 晁红娟,雷占兰,刘爱琴,等. *Omega-3* 多不饱和脂肪酸性质、功能及主要应用[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(10): 122-130.
- [4] 孙翔宇,高贵田,段爱莉,等. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 418-423.
- [5] 马婷,宁德鲁. 中国核桃产业国际竞争力分析[J]. 林业科技通讯, 2021(1): 3-7.
- [6] HERNANDEZ E M. 4 - Specialty oils: functional and nutraceutical properties[J]. *Funct Diet Lipid*, 2016(6): 69-101.
- [7] 狄青,周丽佳. 塑化剂的毒性及安全标准研究[J]. 科技资讯, 2013(5): 230.
- [8] CERMAK S C, JOHN A L, EVANGELISTA R L. Enrichment of decanoic acid in cuphea fatty acids by molecular distillation [J]. *Ind Crop Prod*, 2007, 26: 93-99.
- [9] TOVAR L P T, MACIEL M R W, PINTO G M F, et al. Factorial design applied to concentrate bioactive component of cymbopogon citratus essential oil using short path distillation[J]. *Chem Eng Res Des*, 2010, 88: 239-244.
- [10] MARTINS P F, ITO V M, BATISTELLA C B, et al. Free fatty acid separation from vegetable oil deodorizer distillate using molecular distillation process [J]. *Separ Purif Technol*, 2006, 48: 78-84.
- [11] AZCAN N, YILMAZ O. Microwave assisted transesterification of waste frying oil and concentrate methyl ester content of biodiesel by molecular distillation[J]. *Fuel*, 2013, 104: 614-619.
- [12] 普义鑫,周文化,任费燕,等. 分子蒸馏精制棕榈油加工技术研究[J]. 粮食与油脂, 2010(11): 14-16.
- [13] WU W L, WANG C, ZHENG J X. Optimization of deacidification of low calorie cocoa butter by molecular distillation[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2012, 46: 563-570.
- [14] GUO Z G, WANG S R, GU Y L, et al. Separation characteristics of biomass pyrolysis oil in molecular distillation[J]. *Separ Purif Technol*, 2010, 76: 52-57.
- [15] 李红,王爱辉,刘延奇. 分子蒸馏在油脂工业中的应用[J]. 中国油脂, 2008, 33(10): 57-60.
- [16] 刘玉兰,杨金强,张明明,等. 分子蒸馏法脱除油脂中塑化剂效果的研究[J]. 粮油与油脂, 2016(2): 19-22.
- [5] NIKIFORIDIS C V, MATSAKIDOU A, KIOSSEOGLOU V. Composition, properties and potential food applications of natural emulsions and cream materials based on oil bodies [J]. *Rsc Adv*, 2014, 48(4): 25067-25078.
- [6] SU C X, FENG Y N, YE J, et al. Effect of sodium alginate on the stability of natural soybean oil body emulsions[J]. *Rsc Adv*, 2018, 8(9): 4731-4741.
- [7] 刘静,胡经纬,周裔彬. 植物油体的提取及其乳化体系研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 422-429.
- [8] 徐泽健,章绍兵. 植物油体制备工艺及其稳定性研究进展[J]. 中国油脂, 2016, 41(9): 41-45.
- [9] 陈镇,李秀丽,陈法志. 植物油体合成及功能研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(2): 182-191.
- [10] 胡佳,刘春林. 植物油体研究进展[J]. 植物学报, 2017, 52(5): 669-679.
- [11] 田其英,王静. 大豆油体的提取及影响因素研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(4): 7-9.
- [12] 李婷婷,李志远,孙静,等. 牡丹油体提取及其稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(8): 98-103.
- [13] KAPCHIE V N, TOWA L T, HAUCK C, et al. Recycling of aqueous supernatants in soybean oleosome isolation [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2010, 87(2): 223-231.
- [14] 黄冬云,钱海峰,苑华宁,等. 木聚糖酶制取米糠膳食纤维的功能性质[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 30-34.
- [15] 汪勇. 米糠细胞壁提取物理化学性质及其酶解研究[D]. 南京:南京农业大学, 2007.
- [16] 龚玉雷. 纤维素酶和果胶酶复合体系在茶叶提取加工中的应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2013.
- [17] LI X, WANG X, XU D X, et al. Influence of calcium-induced droplet heteroaggregation on the physicochemical properties of oppositely charged lactoferrin coated lutein droplets and whey protein isolate-coated DHA droplets [J]. *Food Funct*, 2017, 8(8): 2748-2759.
- [18] 徐泽健. 花生油体制备及其稳定性研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2017.
- [19] 胡坤. 多糖对大豆分离蛋白乳浊体系特性的影响及其作用机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2003.
- [20] 杨淑暖. 豌豆乳清蛋白与多糖的选择性复凝聚行为及其稳定酸性乳液的应用研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2021.
- [21] 王钧渤. 两种油体乳液及运载 β -CE乳液的稳定性与体外消化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.

(上接第 30 页)