

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.11.002

米糠膳食纤维纤维素酶水解工艺优化及其功能特性研究

Optimization of cellulase hydrolysis process of rice bran dietary fiber and its functional properties

刘艳兰^{1,2} 刘爽¹ 林本平¹ 李燕云¹ 易翠平^{1,2}LIU Yan-lan^{1,2} LIU Shuang¹ LIN Ben-ping¹ LI Yan-yun¹ YI Cui-ping^{1,2}

(1. 长沙理工大学化学与食品工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南省杂粮健康食品工程技术研究中心, 湖南 长沙 410100)

(1. School of Chemistry and Food Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Multi-grain Healthy Food Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410100, China)

摘要:目的:探讨纤维素酶水解制备米糠膳食纤维的工艺条件,分析引起米糠膳食纤维功能性质差异的原因。方法:采用单因素试验优化工艺条件,测定膳食纤维的化学成分、持油力和吸附胆酸钠能力,扫描电镜观察其微观结构。结果:纤维素酶用量 100 U/g,反应时间 5 h,料液比($m_{\text{米糠纤维}}:V_{\text{水}}$) 1:15 (g/mL)时,不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率无显著变化。水解后膳食纤维的纤维素和半纤维素质量分数分别从 26.23%和 28.71%显著性下降($P<0.05$)至 18.29%和 25.24%,木质素质量分数从 20.22%显著性增加($P<0.05$)至 31.46%。扫描电镜分析表明可溶性膳食纤维的表面致密光滑,未见明显的孔洞结构,水解后的不溶性膳食纤维表面出现更多且更深的孔洞结构。米糠可溶性膳食纤维、不溶性膳食纤维和水解前的米糠膳食纤维的持油力分别为 0.86, 5.21, 4.15 g/g,胆酸钠吸附率分别为 15.17%, 24.04%, 20.84%。结论:米糠膳食纤维的功能性质差异是由其化学成分和表面结构的差异引起的。

关键词:纤维素酶;米糠;可溶性膳食纤维;不溶性膳食纤维;化学成分;表面结构;持油力;胆酸钠

Abstract: Objective: To study the technological conditions of pre-

基金项目:长沙理工大学青年教师成长计划项目(编号:2019QJCZ037);湖南省杂粮健康食品工程技术研究中心(编号:2019TP2008);湖南省营养谷物科技创新团队项目

作者简介:刘艳兰,女,长沙理工大学讲师,博士。

通信作者:易翠平(1973—),女,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: 109823769@qq.com

收稿日期:2021-05-02

paring rice bran dietary fibers by cellulase hydrolysis, and analyze the reasons for the difference in the functional properties of different rice bran dietary fibers. **Methods:** Single factor experiment was used to optimize the process conditions. The chemical composition, oil holding capacity and sodium cholate adsorption capacity of rice bran dietary fibers were measured. And the microstructures of rice bran dietary fibers were observed by scanning electron microscope. **Results:** When the dosage of cellulase was 100 U/g, the reaction time was 5 hours, and the ratio of material to liquid ($m_{\text{rice bran dietary fiber}}:V_{\text{water}}$) was 1:15 (g/mL), there were no significant change in the yield of insoluble dietary fiber and soluble dietary fiber. After hydrolysis, the cellulose and hemicellulose content of rice bran dietary fiber decreased significantly ($P<0.05$) from 26.23% and 28.71% to 18.29% and 25.24%, respectively. And the lignin content increased significantly ($P<0.05$) from 20.22% to 31.46%. Scanning electron microscopy analysis indicated that the surface of the soluble dietary fiber was dense and smooth, without obvious pore structure, and the surface of the insoluble dietary fiber after hydrolysis showed more and deeper pore structure. The oil holding capacity of rice bran soluble dietary fiber, insoluble dietary fiber and dietary fiber without hydrolysis were 0.86, 5.21 and 4.15 g/g, respectively. And the adsorption rates of sodium cholate of rice bran soluble dietary fiber, insoluble dietary fiber and dietary fiber without hydrolysis were 15.17%, 24.04% and 20.84%, respectively. **Conclusion:** The differences in the functional properties of different rice bran dietary fibers are caused by the differences in their chemical compositions and fiber surface structures.

Keywords: cellulase; rice bran; soluble dietary fiber; insoluble

dietary fiber; chemical composition; surface structure; oil holding capacity; sodium cholate

膳食纤维具有促进胃肠道健康、防治肥胖症和降低心血管疾病发病率等益生功能^[1]。根据其在水溶液中的溶解度可分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维^[2]。水溶性膳食纤维具有增稠性、乳化性和益生元等功能特性,可以作为功能性食品配料应用于多种食品中^[3]。水不溶性膳食纤维能够吸收食物中的有害物质,弱化消化道中细菌排出的毒素,还可增加食物通过消化道的速率,帮助通便^[4]。

米糠是一种重要的膳食纤维来源,通常采用物理、化学或酶水解的方法去除米糠的淀粉、蛋白质和油脂提取米糠膳食纤维,但这样提取出的米糠膳食纤维的功能性质较差。目前已有学者^[5-6]利用纤维素酶改善米糠膳食纤维的功能性质,但利用纤维素酶处理米糠膳食纤维同时制备可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维还未见相关报道,可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维的化学成分和表面结构与其理化性质的作用关系报道也较少。试验拟探讨纤维素酶水解米糠膳食纤维的工艺条件对可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率的影响,并分析纤维素酶水解前后膳食纤维的化学成分、表面结构、持油力和吸附胆酸钠能力的差异,以为米糠高附加值产品的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

米糠:金健米业股份有限公司;

α -高温淀粉酶(4 000 U/g)、碱性蛋白酶(200 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(200 U/mg)和纤维素酶(400 U/mg):上海瑞永生物有限公司;

其他化学试剂:分析纯,国药集团化学试剂(上海)有限公司。

1.2 仪器与设备

恒温培养振荡器:HNY-200D型,天津欧诺仪表有限公司;

紫外分光光度计:TU1810型,北京普析通用仪器有限责任公司;

冷冻干燥机:FD-1-50型,北京博医康实验仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 米糠膳食纤维的制备 1 000 g米糠经石油醚脱脂,在高速分散机中于4 000 r/min处理60 min后,经40目筛水洗过滤得到水洗后的米糠,于60℃烘干后放置于干燥器中。将200 g水洗后的绝干米糠在200 U/g α -高温淀粉酶,95℃反应1 h后,将pH调至8.0~8.2;加

入50 U/g的蛋白酶,50℃反应1 h,调pH至4.2~4.4;加入120 U/g淀粉葡萄糖苷酶,60℃反应1 h,沸水浴灭酶20 min,用4倍体积的95%乙醇沉淀,过滤,60℃烘箱中干燥24 h得到米糠膳食纤维。

1.3.2 纤维素酶水解米糠膳食纤维 将米糠膳食纤维加入到含有纤维素酶的pH 4.6的醋酸-醋酸钠缓冲液中,改变纤维素酶用量、反应时间和料液比,探讨水解条件对不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率的影响。反应结束后将样品取出,沸水浴灭酶20 min,抽滤,滤渣分别用体积分数为78%和95%的乙醇(4倍体积滤渣)洗2次,丙酮(4倍体积滤渣)洗一次,60℃烘箱中干燥12 h得到不溶性膳食纤维;用95%乙醇沉淀滤液中的多糖,冰箱冷冻过夜后,冷冻干燥48 h得到可溶性膳食纤维。分别按式(1)和式(2)计算可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率。

$$I_{DF} = \frac{m_1}{m}, \quad (1)$$

$$S_{DF} = \frac{m_2}{m}, \quad (2)$$

式中:

I_{DF} ——米糠不溶性膳食纤维得率, %;

S_{DF} ——米糠可溶性膳食纤维得率, %;

m_1 ——绝干滤渣的质量, g;

m_2 ——绝干滤液沉淀物的质量, g;

m ——绝干纤维素酶水解前米糠膳食纤维的质量, g。

1.3.3 米糠膳食纤维基本成分测定

(1) 淀粉含量:按GB 5009.9—2016执行。

(2) 蛋白质含量:按GB 5009.5—2016执行。

(3) 木质素含量:按GB/T 2677.8—1994执行。

(4) 半纤维素含量:按GB/T 2677.9—1994执行。

(5) 纤维素含量:参照文献^[7]略做修改,称取1 g样品放在锥形瓶中,加入硝酸-乙醇混合液,沸水浴中反应1 h后过滤,滤渣再在沸水浴中加热1 h后过滤直至纤维变白。

1.3.4 胆酸钠吸附能力测定

(1) 胆酸钠标准曲线的绘制:分别准确称量胆酸钠0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 mg置于50 mL容量瓶,用蒸馏水溶解并定容。移取各个不同浓度的胆酸钠标准液1 mL于15 mL具塞试管中,加入6 mL 45%的 H_2SO_4 ,混匀后加入1 mL 0.3%糠醛,65℃恒温水浴中反应30 min,冷却至室温后,于620 nm处测吸光度,以胆酸钠量为横坐标,吸光度值为纵坐标绘制标准曲线。胆酸钠吸附率的标准曲线方程: $y = 0.0089x + 0.0585, R^2 = 0.9939$ 。

(2) 样品测定:采用糠醛比色法^[8]。量取100 mL 0.15 mol/L的NaCl溶液(含有0.2 g胆酸钠)于250 mL锥形瓶中,加入0.5 g纤维样品于锥形瓶中搅拌,在恒温

震荡培养器中于 37 °C 反应 2 h, 到达时间后离心 20 min, 准确移取 1 mL 于 620 nm 处测定其吸光度, 并计算胆酸钠含量, 根据反应前后的含量差计算胆酸钠吸附率。

1.3.5 持油力测定 依据许晖^[3]的方法略做改进: 准确称取 0.5 g 膳食纤维样品置于 25 mL 离心管, 加入 10 mL 玉米油, 室温放置 30 min 并不时搅动, 4 000 r/min 离心 30 min, 弃去上层油液, 用滤纸吸干管壁上的水分和油脂, 静置 5 min, 称重。按式(3)计算持油力。

$$O_{HC} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (3)$$

式中:

O_{HC} ——持油力, g/g;

M_1 ——绝干膳食纤维样品的质量, g;

M_2 ——沉淀膳食纤维样品的质量, g。

1.3.6 扫描电镜分析 在氮气环境下, 用离子溅射法在干燥后的纤维样品表面蒸镀一层 10~20 nm 的铂金膜后通过扫描电子显微镜对纤维样品进行观测拍照。

1.3.7 单因素试验

(1) 纤维素酶用量: 固定料液比 ($m_{\text{米糠纤维}} : V_{\text{水}}$) 1 : 15 (g/mL), 水解时间 5 h, 反应温度 60 °C, 考察纤维素酶用量 (20, 40, 60, 80, 100, 120 U/g) 对可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率的影响。

(2) 水解时间: 固定纤维素酶用量 100 U/g, 料液比 ($m_{\text{米糠纤维}} : V_{\text{水}}$) 1 : 15 (g/mL), 反应温度 60 °C, 考察水解时间 (3, 4, 5, 6, 7 h) 对可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率的影响。

(3) 料液比: 固定纤维素酶用量 100 U/g, 水解时间 5 h, 反应温度 60 °C, 考察料液比 ($m_{\text{米糠纤维}} : V_{\text{水}}$) [1 : 8, 1 : 10, 1 : 15, 1 : 20, 1 : 25 (g/mL)] 对可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率的影响。

1.3.8 统计分析 所有试验平行测定 3 次, 数据结果以平均值±标准方差表示, 采用 SPSS 17.0 对数据进行方差分析和显著性分析。

2 结果与讨论

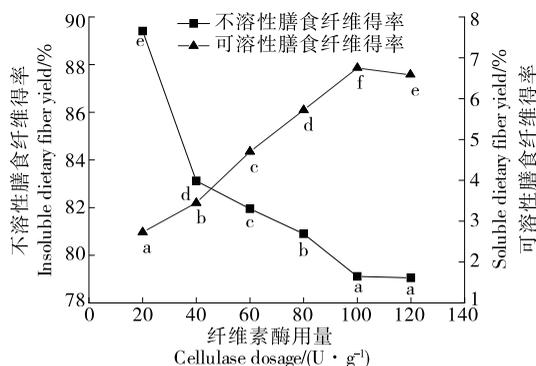
2.1 纤维素酶用量对膳食纤维得率的影响

由图 1 可以看出, 当纤维素酶用量从 20 U/g 增加到 100 U/g 时, 不溶性膳食纤维得率显著减小 ($P < 0.05$), 可溶性膳食纤维得率显著增加 ($P < 0.05$)。说明随着纤维素酶用量的增加, 米糠膳食纤维的水解程度逐渐提高。当纤维素酶添加量为 100 U/g 时, 可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率分别为 79.11% 和 6.56%; 当纤维素酶添加量超过 100 U/g 后, 可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率无显著变化。纤维素酶对米糠膳食纤维的水解作用主要是使其细胞壁纤维素大分子上的 1,4-β-糖苷键断裂, 使结晶区的纤维素降解生成无定形区的纤维素和可溶性的低聚糖从细胞壁中溶解出来^[9], 得到可溶性膳

食纤维。因此随着纤维素酶用量的增加, 其与细胞壁的反应性能增加, 导致其水解后得到的不溶性膳食纤维得率减少, 可溶性膳食纤维得率增多。由于纤维素酶与细胞壁的反应位点数目是一定的, 增加纤维素酶用量也不会出现更多的反应位点与其吸附结合, 因此过量的纤维素酶不会造成膳食纤维的细胞壁被进一步降解^[10]。因此, 纤维素酶用量应当控制在 100 U/g。

2.2 酶解时间对膳食纤维得率的影响

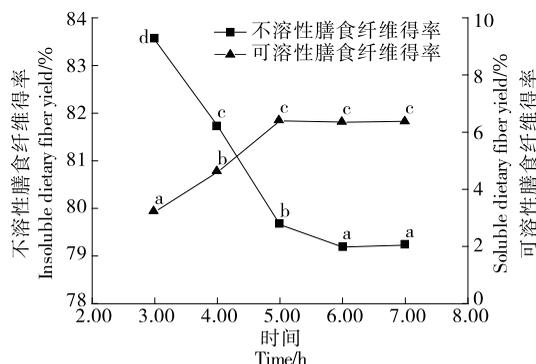
由图 2 可知, 当纤维素酶用量为 100 U/g 时, 米糠膳食纤维的水解程度随反应时间的增加而增大, 不溶性膳食纤维得率显著下降 ($P < 0.05$), 可溶性膳食纤维得率显著增加 ($P < 0.05$)。当反应 5 h 时, 不溶性膳食纤维得率为 79.66%, 可溶性膳食纤维得率为 6.40%。当反应时间超过 5 h 后, 可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率无



同一曲线小写字母不同表示有显著性差异 ($P < 0.05$)

图 1 纤维素酶用量对米糠不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率的影响

Figure 1 The effect of the cellulase content on the yield of rice bran insoluble dietary fiber and soluble dietary fiber



同一曲线小写字母不同表示有显著性差异 ($P < 0.05$)

图 2 酶解时间对米糠不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率的影响

Figure 2 The effect of enzymolysis time on the yield of rice bran insoluble dietary fiber and soluble dietary fiber

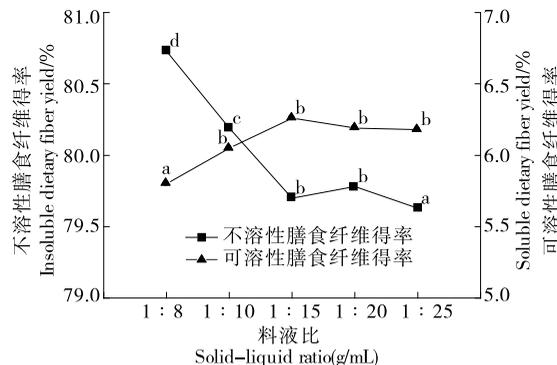
显著变化。在纤维素酶水解反应中,随着反应时间的延长,产物浓度不断增加,反应底物浓度不断降低,这两个因素会抑制纤维素酶水解反应的持续高效进行,从而使米糠膳食纤维的水解程度基本保持不变。因此纤维素酶的水解时间应当控制在 5 h。

2.3 料液比对膳食纤维得率的影响

由图 3 可以看出,与纤维素酶用量和反应时间相比,料液比对米糠不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率影响较小。当料液比($m_{\text{米糠纤维}} : V_{\text{水}}$)达到 1 : 15 (g/mL)后,继续增加用水量,米糠不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率无显著变化,可能是因为增加溶剂水,使酶的浓度降低,酶反应速率变慢,所以米糠膳食纤维的水解程度变化不大。试验中,米糠膳食纤维与酶反应的料液比较大,可能是因为酶反应过程中,米糠膳食纤维粉末吸收了较多的水分引起润胀,从而消耗了部分水。为了保证酶水解反应的顺利进行,需要较大的料液比,但是过大的料液比会导致反应时间延长和能耗增加,所以料液比($m_{\text{米糠纤维}} : V_{\text{水}}$)宜选用 1 : 15 (g/mL)。

2.4 米糠膳食纤维化学成分

水洗米糠经过 α -高温淀粉酶、碱性蛋白酶和淀粉葡萄糖苷酶水解后制备得到米糠膳食纤维。按纤维素酶用量 100 U/g,反应时间 5 h,料液比($m_{\text{米糠纤维}} : V_{\text{水}}$) 1 : 15 (g/mL)的制备工艺条件水解米糠膳食纤维得到米糠不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维,将米糠不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维和纤维素酶水解前的米糠膳食纤维进行化学成分、表面结构和功能性质的测定。表 1 表明水解前的米糠膳食纤维原料的纤维素、半纤维素和木质素含量为 75.16%。Wen 等^[11]报道米糠膳食纤维的纤维素、半纤维素和木质素含量为 56.4%~76.2%。与未经过纤维素酶水解的米糠膳食纤维原料相比,水解后米糠



同一曲线小写字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)

图 3 料液比对米糠不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率的影响

Figure 3 The effect of solid-liquid ration on the yield of rice bran insoluble dietary fiber and soluble dietary fiber

表 1 米糠膳食纤维的化学成分分析[†]

化学成分	水解前的膳食纤维原料	水解后的不溶性膳食纤维	%
纤维素	26.23±0.81 ^b	18.29±0.59 ^a	
木质素	20.22±0.26 ^a	31.46±0.80 ^b	
半纤维素	28.71±0.57 ^b	25.24±0.41 ^a	
淀粉	3.68±0.32 ^b	2.66±0.48 ^a	
蛋白质	3.15±0.21 ^b	2.42±0.42 ^a	

[†] 同行小写字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)。

不溶性膳食纤维的纤维素、半纤维素、蛋白质和淀粉含量显著下降($P < 0.05$),木质素含量显著上升($P < 0.05$)。纤维素酶是一种含有少量半纤维素酶的复合酶,半纤维素酶使米糠膳食纤维的半纤维素发生了降解反应,因此米糠膳食纤维的半纤维素含量在水解反应后下降。在膳食纤维细胞壁结构中,蛋白质和纤维素交织缠绕在一起^[12],蛋白质随纤维素的降解溶出从细胞壁中溶解出来,所以纤维素酶水解后,米糠膳食纤维的蛋白质含量也下降。Ansharullah 等^[12]报道膳食纤维细胞壁中的纤维素和蛋白质的连接键可以被纤维素酶水解,使蛋白质从细胞壁中溶解出来,导致蛋白质含量下降。

2.5 米糠膳食纤维表面结构

如图 4 所示,未进行纤维素酶水解的米糠膳食纤维表面呈网络状的纤维结构,并且有孔洞。与未水解的米糠膳食纤维比较,经纤维素酶水解后的米糠不溶性膳食纤维表面出现较多且较深的孔洞结构,并且其比表面积也增加了。说明米糠膳食纤维经过纤维素酶水解后,由

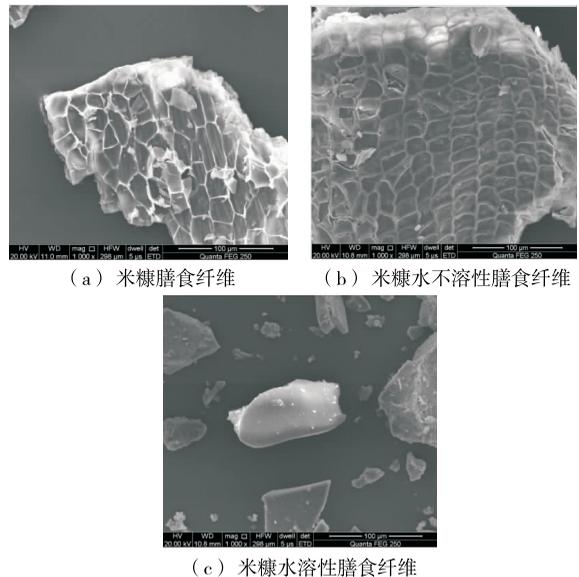


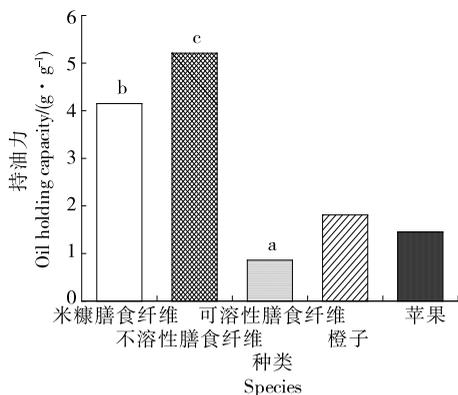
图 4 米糠膳食纤维的扫描电镜图

Figure 4 The SEM photograph of rice bran dietary fiber ($\times 1000$)

于纤维素的降解溶出导致了其表面结构的改性。米糠可溶性膳食纤维的表面致密光滑,无明显的孔洞结构。有研究^[13]表明,膳食纤维的表面结构对于膳食纤维的功能性质,特别是吸附性质起着非常重要的作用。因此可以预测不同表面结构的米糠膳食纤维的持油力和吸附胆酸钠能力是不同的。

2.6 持油力

通常来说,具有高持油力的膳食纤维有利于在食品加工过程中吸附食品的油脂从而降低食品的油脂含量。在人体的生理功能性质上,膳食纤维能够通过吸收肠道内的油脂从而降低血清的胆固醇水平^[14]。从图 5 可以看出,纤维素酶水解前后的米糠不溶性膳食纤维的持油力较高,高于橙子膳食纤维的(1.81 g/g)和苹果膳食纤维的(1.45 g/g)^[15]。纤维素酶水解后的米糠不溶性膳食纤维的持油力显著($P < 0.05$)高于未水解的。纤维素酶水解前的米糠膳食纤维和水解后的不溶性膳食纤维的持油力高,可能是因为它含有较高含量的木质素。Navarro-González 等^[14]报道西红柿膳食纤维中较低的持油力是由其较低的木质素含量造成的。Sosulski 等^[16]也发现木质素含量高的膳食纤维种类持有较高的持油力。同时从图 5 也可以看出,经纤维素酶水解后制得的可溶性膳食纤维持油力较低,只有(0.82±0.13) g/g。黄冬云^[17]制得的米糠可溶性膳食纤维的持油力也较低,为(0.89±0.10) g/g。米糠可溶性膳食纤维的持油力低,是因为可溶性膳食纤维的化学成分主要是多糖,其木质素含量很少。另一方面,从米糠膳食纤维的微观结构图(图 4)可以看出,与未进行纤维素酶水解处理的米糠膳食纤维相比,纤维素酶水解后的不溶性膳食纤维的表面结构更加疏松,同时也出现了更多的孔洞和毛细管结构,并且其比表面积增加。米糠可溶性膳食纤维表面光滑致密,无明显的孔洞结构,比表面积也是最小的。前人^[11-13,18]研究表明:多孔且表



小写字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)

图 5 米糠膳食纤维种类对持油力的影响

Figure 5 The oil holding capacity of rice bran dietary fiber

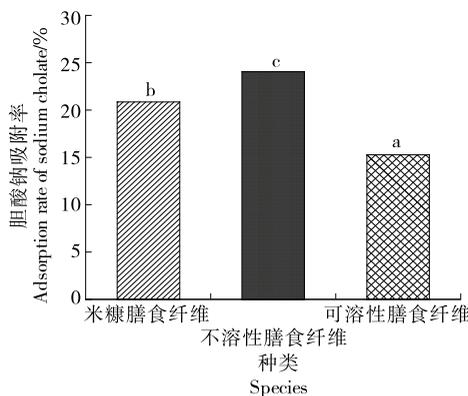
面结构疏松的固体对于液体的吸附能力要高于表面结构致密且少孔洞的固体。因此,米糠不溶性膳食纤维的持油力显著($P < 0.05$)高于可溶性膳食纤维的;纤维素酶水解后的米糠不溶性膳食纤维的持油力显著($P < 0.05$)高于水解前的米糠膳食纤维。

2.7 吸附胆酸钠能力

图 6 显示,米糠膳食纤维原料、不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维都具有吸附胆酸钠的能力,其中可溶性膳食纤维的胆酸钠吸附率最低。钱海峰等^[5]也研究发现可溶性膳食纤维比不溶性膳食纤维吸附胆酸钠的能力低。米糠可溶性膳食纤维对胆酸钠的吸附结合能力低,是因为米糠可溶性膳食纤维持油力低(图 5),且米糠可溶性膳食纤维的化学成分主要是多糖,水溶性较高;也有可能是因为米糠可溶性膳食纤维的表面结构光滑又致密(图 4),限制了其对胆酸钠的吸附能力。图 6 的研究结果也表明纤维素酶改性后的米糠不溶性膳食纤维吸附胆酸钠的能力要高于未改性的米糠膳食纤维。从米糠膳食纤维的表面结构图(图 4)可以看出,与未进行纤维素酶水解处理的米糠膳食纤维相比,纤维素酶水解后的不溶性膳食纤维的表面结构更加疏松,同时也出现了更多的孔洞和毛细管结构,且其比表面积增加。米糠可溶性膳食纤维的表面结构光滑致密,无明显的孔洞结构,比表面积也是最小的。前人^[11-13]研究表明:多孔且表面结构疏松的物质其吸附能力要高于表面结构致密且少孔洞的物质。Caroline 等^[19]发现用果胶酶和纤维素酶混合处理后的羽扇豆籽膳食纤维结合胆酸盐的能力要高于未处理产品,也说明了酶水解造成的膳食纤维细胞壁的降解可以提高膳食纤维结合胆酸盐的能力。

3 结论

与料液比相比,纤维素酶用量和反应时间可以显著影响米糠可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维得率。纤维



小写字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)

图 6 米糠膳食纤维种类对胆酸钠的吸附率

Figure 6 The absorption rate of rice bran dietary fiber to sodium cholate

素酶水解后,米糠膳食纤维的纤维素、半纤维素、蛋白质和淀粉含量明显下降,木质素含量明显上升。可溶性膳食纤维的表面结构致密光滑,无明显的孔洞结构;水解前的膳食纤维和水解后的不溶性膳食纤维的表面均出现了网络状的疏松多孔结构,且水解后得到的不溶性膳食纤维表面出现更多且更深的孔洞结构,并且其比表面积也增加了。水解前的米糠膳食纤维和水解后的不溶性膳食纤维对胆酸钠的吸附能力显著高于可溶性膳食纤维。不溶性膳食纤维的持油力显著高于可溶性膳食纤维;纤维素酶水解后的米糠不溶性膳食纤维的持油力显著高于未水解前的米糠膳食纤维。不同种类米糠膳食纤维持油力和吸附胆酸钠能力的差异是由其化学成分和表面结构的差异造成的。膳食纤维的功能性质和其化学结构的关系还有待于进一步的深入研究。

参考文献

- [1] 张宏邦, 罗洁, 易翠平, 等. 稻米膳食纤维的提取、改性及应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 141-144.
ZHANG Hong-bang, LUO Jie, YI Cui-ping, et al. Advances in extraction, modification and application of rice dietary fiber [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(6): 141-144.
- [2] 罗磊, 王雅琪, 马丽苹, 等. 绿豆皮可溶性膳食纤维提取工艺优化及其物理特性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 144-149.
LUO Lei, WANG Ya-qi, MA Li-ping, et al. Study and optimization on extraction process and physical characteristics of soluble dietary fiber from Phaseolus radiatus Hull[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 144-149.
- [3] 许晖. 用挤压法提高米糠中可溶性膳食纤维含量的研究[J]. 食品与机械, 1999(6): 19-20.
XU Hui. A study on raising the SDF contents in rice bran by extrusion[J]. Food & Machinery, 1999(6): 19-20.
- [4] WANG C A, SONG R A, WEI S B, et al. Modification of insoluble dietary fiber from ginger residue through enzymatic treatments to improve its bioactive properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 235-251.
- [5] 钱海峰, 黄冬云, 苑华宁, 等. 纤维素酶对米糠可溶性膳食纤维含量及抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 112-117.
QIAN Hai-feng, HUANG Dong-yun, YUAN Ning-hua, et al. Effects of cellulase enzyme modification on soluble dietary fibre content and antioxidant activity of rice bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(15): 112-117.
- [6] 胡叶碧, 王璋. 纤维素酶和木聚糖酶对玉米皮膳食纤维组成和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2006, 27(11): 103-105.
HU Bi-ye, WANG Zhang. The effect of cellulase and xylanase hydrolysis on the composition and functional properties of corn bran dietary fibers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 27(11): 103-105.
- [7] 王林风, 程远超. 硝酸乙醇法测定纤维素含量[J]. 化学研究, 2011, 22(4): 52-55.
WANG Lin-feng, CHEG Yan-chao. Determination the content of cellulose by nitric acid-ethanol method[J]. Chemical Research, 2011, 22(4): 52-55.
- [8] 陈亚非, 赵谋明. 水溶性与水不溶性膳食纤维对油脂、胆固醇和胆酸钠吸附作用研究[J]. 现代食品科技, 2005(3): 64-66.
CHEN Ya-fei, ZHAO Mou-ming. Adsorption capacity of dietary fiber complexes for fat, cholesterol and bile acid in vitro[J]. Guangzhou Food Science and Technology, 2005(3): 64-66.
- [9] YU Y, ZHANG J. Research progress in cellulose degradation by cellulase[J]. Chemistry, 2016, 9(2): 118-128.
- [10] 刘欢, 贺连斌, 魏静, 等. 纤维素酶和半纤维素酶改性胡萝卜纤维的研究[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(2): 78-81.
LIU Huan, HE Lian-bin, WEI Jing, et al. Study on carrot fiber modification with cellulase and hemicellulase[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(2): 78-81.
- [11] WEN Y, NIU M, ZHANG B, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 344-351.
- [12] ANSHARULLAH J A H, COLIN F C. Application of carbohydrase in extraction protein from rice bran[J]. J Sci Food Agric, 1997, 74: 141-146.
- [13] XIE F Y, ZHAO T, WANG H C, et al. Structural and physicochemical characteristics of rice bran dietary fiber by cellulase and high-pressure homogenization[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1 270.
- [14] NAVARRO-GONZÁLEZ I, GARCÍA-VALVERDE V, GARCÍA-ALONSO J, et al. Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber[J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1 528-1 535.
- [15] FIGUEROL A F, HURTADO M L, ESTEVEZ A M, et al. Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment[J]. Food Chemistry, 2005, 91: 395-401.
- [16] SOSULSKI F W, CADDEN A M. Composition and physiological properties of several sources of dietary fiber[J]. Food Sci, 1982, 47: 1 472-1 477.
- [17] 黄冬云. 米糠膳食纤维的酶法改性及功能性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 15.
HUANG Dong-yun. Enzymatic modification and functional properties of rice bran dietary fiber [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 15.
- [18] 杨正红, 高原. 含有微孔的多孔固体材料的比表面测定[J]. 现代科学仪器, 2010(1): 97-102.
YANG Zheng-hong, GAO Yuan. BET surface area analysis on microporous materials[J]. Modern Scientific Instruments, 2010(1): 17-21.
- [19] CORNFINE C, HASENKOPF K, EISNER P, et al. Influence of chemical and physical modification on the bile acid binding capacity of dietary fibre from lupins (*Lupinus angustifolius* L.) [J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 638-644.