

改性处理对绿豆皮膳食纤维结构及功能特性的影响

刘鸿铖^{1,2}, 樊红秀^{1,3}, 赵鑫^{1,4}, 张闪闪^{1,3}, 刘婷婷^{1,2*}, 王大为^{1,2}

¹吉林农业大学食品科学与工程学院 长春 130118

²农业农村部食用菌加工技术集成科研基地 长春 130118

³吉林省粮食精深加工与高效利用工程研究中心 长春 130118

⁴吉林省粮食精深加工与副产物高效利用技术创新重点实验室 长春 130118)

摘要 以绿豆皮膳食纤维为试验对象,采用挤出改性、酶解改性、挤出-酶解复合改性 3 种处理方式对其进行改性处理。以持水力、持油力、膨胀力、阳离子交换能力、吸附葡萄糖能力和吸附胆固醇能力为评价指标,研究改性处理对绿豆皮膳食纤维功能特性的影响。以扫描电子显微镜、X 射线衍射和傅里叶变换红外光谱法表征改性处理对绿豆皮膳食纤维结构的影响。结果表明:挤出-酶解复合改性处理的效果最明显,其功能特性得到显著改善,持水力、持油力、膨胀力、阳离子交换能力、吸附葡萄糖能力分别是未改性绿豆皮膳食纤维的 1.46,1.15,1.87,6.98,1.66 倍;在 pH 2 和 pH 7 条件下对胆固醇的吸附能力分别达(2.38±0.05)mg/(mL·g)和(3.45±0.12)mg/(mL·g)。扫描电子显微镜观察结果表明,挤出-酶解复合改性处理后的绿豆皮膳食纤维表面结构粗糙、疏松,出现多层褶皱或多孔性特征。X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱结果表明,挤出-酶解复合改性处理后的绿豆皮膳食纤维的相对结晶度最低,各纤维素组分重新分布,部分不溶性膳食纤维(IDF)向可溶性膳食纤维(SDF)转化。结论:挤出-酶解复合改性处理是一种改性膳食纤维的较好方法,可为提高绿豆皮膳食纤维的利用率和进一步开发利用其营养价值提供理论依据。

关键词 挤出-酶解复合改性; 绿豆皮; 膳食纤维; 结构; 功能特性

文章编号 1009-7848(2022)09-0082-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.09.009

绿豆 (*Vigna radiata* (Linn.) Wilczek, mung bean), 别名菽豆、青小豆、植豆,为我国传统的一年生豆科草本作物,其种植历史在 2000 年以上。我国绿豆的种植区域遍布各地,其中以东北地区、淮河及黄河流域的平原地区为主产区,年产量在 100 万 t 以上^[1]。绿豆营养十分丰富,其籽粒中淀粉和蛋白质含量的总和约为 80%,此外,还含有多种矿物质、维生素以及脂肪等成分^[2-3]。绿豆籽粒种皮的主要成分是膳食纤维(DF),还含有皂苷、黄酮类化合物、萜醌类及生物碱等多种生物活性物质^[4]。

绿豆皮是绿豆的种皮,是绿豆加工企业生产豆芽过程中产生的副产物,目前多用作肥料、饲料贱卖或废渣直接扔掉,未得到充分利用,浪费了这

一良好的资源。绿豆皮中膳食纤维的含量在 75% 以上,是生产高品质膳食纤维的良好材料。膳食纤维由于具有通便排毒,预防心血管疾病,调节血糖等多种生理功能,被世界上公认为七大营养素之一^[5]。膳食纤维分为可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维(IDF),其中 SDF 的生理活性要优于 IDF,也被誉为高品质膳食纤维^[6]。天然的膳食纤维中 SDF 含量较少,IDF 含量过多,导致其口感较差,限制了其在食品配料中的广泛应用。如何采取简便、安全与高效的改性手段,使 IDF 尽可能多地转化为 SDF,现已成为膳食纤维改性研究的热点^[7-8]。

目前,挤出和酶解处理对膳食纤维的改性都有较好的作用,且改性后膳食纤维安全无害,可应用于食品工业。刘婷婷等^[9]发现单螺杆挤出改性处理,可以大幅度降低香菇柄纤维的平均相对分子质量和聚合度,持油力、膨胀力等理化指标均明显比改性前增加。张海芳等^[10]对比了不同酶法处理马铃薯渣膳食纤维,发现复合酶改性比其它单一酶法改性能显著提高膳食纤维的理化性质及功

收稿日期: 2021-09-01

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20210344KJ); 吉林省科技发展计划项目(20200502001NC,20200403165SF)

作者简介: 刘鸿铖(1987—),男,博士,讲师

通信作者: 刘婷婷 E-mail: liutingting@jlau.edu.cn

能性单糖含量。周爱丽^[11]将绿豆皮进行单螺杆挤出改性后,SDF 含量增加到 9.27%,提高了绿豆皮膳食纤维孔洞率和表面积,同时未破坏 SDF 的分子结构,官能团也未发生变化。朱玉等^[12]利用纤维素酶改性小米糠膳食纤维,改性后的膳食纤维胆固醇吸附量比改性前提高了 1.40 倍。

目前将挤出处理与酶解改性相结合来改善绿豆皮膳食纤维功能特性的研究还鲜见报道。为提高绿豆皮膳食纤维功能特性,本研究将绿豆皮膳食纤维进行改性处理,以持水力、持油力、膨胀力、阳离子交换能力、吸附葡萄糖能力和吸附胆固醇能力为评价指标,研究改性处理对绿豆皮膳食纤维功能特性的影响。采用扫描电子显微镜、X 射线衍射和傅里叶变换红外光谱法研究改性处理对绿豆皮膳食纤维结构的影响,为提高绿豆皮膳食纤维的利用率和进一步合理应用其营养价值提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

绿豆(一级),购自长春市中东大市场。

碱性蛋白酶(酶活力 $\geq 3 \times 10^3$ U/mL)、耐高温 α -淀粉酶(酶活力 $\geq 4 \times 10^4$ U/g)、糖化酶(酶活力 $\geq 1.6 \times 10^5$ U/g)、纤维素酶(酶活力 $\geq 1.5 \times 10^4$ U/g),诺维信(中国)生物技术有限公司;三羟甲基氨基甲烷,中国医药(集团)上海化学试剂公司;2-(*N*-吗啉代)乙烷磺酸,中国惠世生化试剂有限公司;葡萄糖,北京化工厂;其它试剂均为市售国产分析纯。

GB1302 电子精密天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;TU-1901 双光束紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;GDE-CSF6 膳食纤维测定仪,意大利 VELP 公司;Nicolet is20 傅里叶变换红外光谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;MiniFlx 600 台式粉末 X 射线衍射仪,日本理学株式会社;Phenom Pro 全自动台式扫描电子显微镜,荷兰 Phenom-World 公司;JC-60A 型单螺杆挤出试验机,长春市盛达食品工业研究所。

1.2 试验方法

1.2.1 绿豆皮的收集与处理 参照王大为等^[13]的方法,并加以修改。挑选表皮无破损、籽粒饱满的

绿豆,移入 35 ℃的温水中浸泡 3 h,除去死豆后将其余绿豆放入 25 ℃的豆芽机中进行恒温培养,每 30 min 喷淋 1 次清水,早晚各换水 1 次,连续培养 3 d 后即可收集绿豆皮,常温条件下晾干后粉碎至 80 目(0.20 mm),置于阴凉干燥处保存备用。

1.2.2 绿豆皮基础组成成分的测定 水分含量测定:直接干燥法,参照《食品安全国家标准 食品中水分的测定》GB 5009.3-2016;脂肪含量测定:索氏抽提法,参照《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》GB 5009.6-2016;灰分含量测定:灼烧重量法,参照《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》GB 5009.4-2016;蛋白质含量测定:参照分光光度法,参照《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》GB 5009.5-2016;总膳食纤维(TDF)、不溶性膳食纤维(IDF)、可溶性膳食纤维(SDF)含量测定:酶重量测定法,参照采用《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》GB 5009.88-2014。

1.2.3 绿豆皮的改性处理

1) 挤出改性 取一定量 1.2.1 节中的绿豆皮粉,采用单螺杆挤出法进行改性,挤出改性参数为:水分添加量 65%(质量分数,下同)、挤出温度 160 ℃。物料经过挤出改性后在 60 ℃条件下进行热风干燥至恒质量。

2) 酶解改性 取一定量 1.3.1 节中的绿豆皮粉,采用纤维素酶解法进行改性,酶解改性参数为:料水比 1:25(g/mL)、纤维素酶添加量 0.80%、pH 5.5、反应温度 50 ℃、反应时间 3.0 h。物料经过酶解改性后在 60 ℃条件下进行热风干燥至恒质量。

3) 挤出-酶解复合改性:取一定量 1.3.1 节中的绿豆皮粉,采用挤出-酶解复合法进行改性,即将绿豆皮粉加入一定量水分和纤维素酶进行混合与调配,经润料搅拌均匀后采用单螺杆挤出机进行改性。挤出-酶解复合改性参数为:水分添加量 70%、纤维素酶添加量 0.30%、pH 5.5、挤出温度 140 ℃。料经过挤出-酶解复合改性后在 60 ℃条件下进行热风干燥至恒质量。

1.2.4 绿豆皮膳食纤维的提取 参照美国官方分析化学家协会《食物中总的、可溶性及不溶性膳食纤维 酶-重量法》AOAC 991.43 提取绿豆皮膳食

纤维。

1.2.5 绿豆皮膳食纤维的结构测定

1.2.5.1 扫描电子显微镜分析 参照 Muneer 等^[14]的试验方法,取适量干燥粉碎至 80 目(0.20 mm)的样品固定于观察台上,离子溅射镀金后放入扫描电子显微镜中,在 5.0 kV 加速电压条件下,对样品 2 000 倍的表面微观结构进行观察、分析。

1.2.5.2 X 射线衍射测试 衍射条件:采用连续扫描法,管电压:40 kV;管电流:40 mA;靶型:Cu-K α ;扫描范围:5°~45°;扫描速度:2°/min;步长:0.02。

1.2.5.3 傅里叶变换红外光谱分析 通过 Nicolet is20 傅里叶变换红外光谱仪测得绿豆皮膳食纤维的傅里叶变换红外光谱曲线^[15]。波数范围为 4 000~400 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,累计扫描次数为 16 次。

1.2.6 绿豆皮膳食纤维功能特性的测定

1.2.6.1 持水力(持油力)的分析测定 参照 Wang 等^[16]的试验方法,并作适当修改。精确称取干燥至恒质量的样品 0.20 g 置于 15 mL 的离心管中,迅速加入蒸馏水(植物油)10 mL,充分搅拌均匀后用食品保鲜膜密封后在室温条件下放置 12 h,然后在室温以 4 000 r/min 的转速离心 30 min,快速倾析上清液,少量残余的水分(油)用滤纸吸干后,记录样品湿质量,采用公式(1)计算持水力和持油力。

$$\text{持水力(持油力)}(\text{g/g}) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (1)$$

式中: m_2 ——吸水(油)后样品与离心管质量之和,g; m_1 ——离心管质量,g; m_0 ——恒质量样品质量,g。

1.2.6.2 膨胀力的分析测定 参考 Chen 等^[17]的试验方法,并稍加改动。精确称取干燥至恒质量的样品 0.25 g 置于 10 mL 量筒中,读取并记录样品自然堆积的体积,然后在室温条件下添加蒸馏水至 5 mL 的刻度线,用食品保鲜膜密封,室温静置 18 h,读取并记录样品吸水膨胀后的体积,采用公式(2)计算膨胀力。

$$\text{膨胀力}(\text{mL/g}) = \frac{V_1 - V_0}{m} \quad (2)$$

式中: V_1 ——样品吸水膨胀后测定的体积,

mL; V_0 ——恒质量样品自然堆积测定的体积,mL; m ——恒质量样品质量,g。

1.2.6.3 阳离子交换能力的分析测定 参照 Chau 等^[18]的试验方法,并适当修改。精确称取干燥至恒质量的样品 1.00 g 置于 250 mL 的洁净锥形瓶中,添加 50 mL 1 mol/L 的 HCl 溶液,充分搅拌均匀后用食品保鲜膜密封后在室温条件下放置 24 h,以便使样品完全被酸化,然后过滤并用蒸馏水充分洗涤样品至滤液不含 Cl⁻,随后将滤渣移入盛有 150 mL 5 g/100 mL 的 NaCl 溶液的锥形瓶中,以 300 r/min 的转速磁力搅拌 30 min,接着滴入 2 滴酚酞指示剂,边振荡边用 0.05 mol/L 的 NaOH 溶液滴定至终点,同时用蒸馏水做空白试验,采用公式(3)计算阳离子交换能力。

$$\text{阳离子交换能力}(\text{mmol/g}) = \frac{(V_1 - V_0) \times C}{m} \quad (3)$$

式中: V_0 ——滴定空白样所用 NaOH 溶液的体积,mL; V_1 ——滴定样品所用 NaOH 溶液的体积,mL; m ——恒质量样品质量,g; C ——滴定所用 NaOH 溶液的浓度,mol/L。

1.2.6.4 吸附葡萄糖能力的分析测定 参考 Peerajit 等^[19]的试验方法,并稍加改动。称取干燥后的样品 2.50 g 置于 250 mL 的烧杯中,加入 150 mL 85%(体积分数)乙醇溶液,水浴 15 min(80 °C)后过滤,滤渣经洗涤 3 次后在 60 °C 条件下进行热风干燥至恒质量。精确称取干燥至恒质量的样品 0.50 g 置于 250 mL 的洁净锥形瓶中,添加 100 mL 浓度为 100 mmol/L 的葡萄糖溶液,充分搅拌均匀后移入 37 °C 恒温振荡水浴中 2,4,6,8,10,12,14,16,18 h,然后迅速取出并以 12 000 r/min 的转速离心 20 min,收取上清液并定容至 100 mL。吸取定容后的上清液 2 mL,采用 DNS 比色法,以葡萄糖标准品绘制葡萄糖标准工作曲线 $y = 0.5344x - 0.0517 (R^2 = 0.9973)$,在 540 nm 波长处测定上清液中葡萄糖的浓度,采用公式(4)计算吸附葡萄糖能力。

$$\text{吸附葡萄糖能力}(\text{mmol/g}) = \frac{(C_1 - C_2) \times V}{m} \quad (4)$$

式中: C_1 ——吸附前葡萄糖溶液中葡萄糖的浓度,mmol/L; C_2 ——吸附后上清液中葡萄糖的浓度,mmol/L; V ——葡萄糖溶液的体积,L,本试验为

0.1 L; m ——恒质量样品质量, g。

1.2.6.5 吸附胆固醇能力的分析测定 参考Zhang等^[20]的试验方法,并作适当修改。取若干新鲜鸡蛋并迅速分离出蛋黄,按照 1:9 的体积比加入蒸馏水并充分搅打均匀成蛋黄乳液。精确称取干燥至恒质量的样品 0.50 g 置于 250 mL 的洁净锥形瓶中,添加 30 mL 蛋黄乳液并充分搅拌均匀。然后分别用 0.1 mol/L HCl 和 0.1 mol/L NaOH 溶液 pH 2 (模拟胃部环境)和 pH 7 (模拟小肠内环境)的磷酸盐缓冲液,在 37 °C 恒温振荡水浴 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 24 h 后,然后迅速取出并以 4 000 r/min 的转速离心 20 min,分别吸取上清液 1 mL,用邻苯二甲醛法,以胆固醇标准品绘制胆固醇标准工作曲线 $y=0.0089x-0.0038 (R^2=0.9915)$,在 550 nm 波长处测定上清液中胆固醇的质量浓度 ρ_1 ,吸附前蛋黄乳液中胆固醇的质量浓度 ρ_2 ,采用公式(5)计算吸附胆固醇能力。

$$\text{吸附胆固醇能力}[\text{mg}/(\text{mL}\cdot\text{g})]=\frac{\rho_2-\rho_1}{m} \quad (5)$$

式中: ρ_2 ——吸附前蛋黄乳液中胆固醇的质量浓度, mg/mL; ρ_1 ——吸附后上清液中胆固醇的质量浓度, mg/mL; m ——恒质量样品质量, g。

1.3 数据处理与统计分析

表 1 绿豆皮基础组成成分

Table 1 Basic components of modified mung bean skin

组别	水分含量/g· (100 g) ⁻¹	脂肪含量/g· (100 g) ⁻¹	蛋白质含量/ g·(100 g) ⁻¹	灰分含量/g· (100 g) ⁻¹	TDF 含量/g· (100 g) ⁻¹	IDF 含量/g· (100 g) ⁻¹	SDF 含量/g· (100 g) ⁻¹
未改性	6.42 ± 0.11 ^a	1.43 ± 0.06 ^a	8.17 ± 0.24 ^a	1.82 ± 0.07 ^a	82.09 ± 0.43 ^a	78.67 ± 0.26 ^a	3.42 ± 0.18 ^a
挤出改性	6.47 ± 0.08 ^a	1.37 ± 0.09 ^a	7.68 ± 0.19 ^b	1.86 ± 0.05 ^a	82.62 ± 0.37 ^a	73.33 ± 0.22 ^b	9.29 ± 0.31 ^b
酶解改性	6.35 ± 0.13 ^a	1.45 ± 0.05 ^a	8.13 ± 0.15 ^a	1.83 ± 0.09 ^a	82.24 ± 0.21 ^a	73.01 ± 0.34 ^b	9.23 ± 0.15 ^b
挤出-酶解改性	6.43 ± 0.09 ^a	1.44 ± 0.08 ^a	7.59 ± 0.13 ^b	1.79 ± 0.11 ^a	82.75 ± 0.39 ^a	70.02 ± 0.43 ^c	12.73 ± 0.27 ^c

注:同一列肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 表面微观结构观察

图 1 为 2 000 倍的扫描电子显微镜观察改性前后绿豆皮膳食纤维的变化。未改性的绿豆皮膳食纤维表面相对较为光滑,有少量褶皱,结构致密,表面略有粗颗粒附着,可能为绿豆取皮过程中粘连的蛋白质^[22](图 1a);经挤出改性处理的绿豆皮膳食纤维,表面褶皱较多,结构发生轻微的蓬松,呈蜂窝状的多孔性特征(图 1b);经酶解改性处理的绿豆皮膳食纤维,表面变得粗糙,褶皱、孔

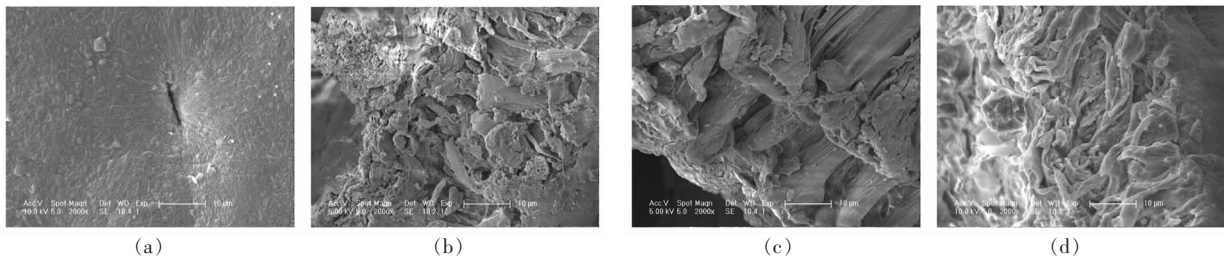
使用 Origin 8.0、Statistic 软件对试验数据进行处理,测定结果采用“平均值±标准误差”($\bar{x} \pm s$)来表示,图中以标准误差作为误差棒。采用 SPSS 22.0 软件 (ANOVA 和 Duncan's multiple range test) 对试验数据进行统计分析, $P<0.05$ 时表示为差异显著, $P<0.01$ 时表示为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 改性绿豆皮基础组成成分

参照食品安全国家标准测定 3 种改性处理方式处理绿豆皮的基础组成成分,绿豆皮改性前后的水分、脂肪、蛋白质、灰分、TDF、IDF 及 SDF 含量见表 1。绿豆皮经过改性处理后,TDF 的含量没有显著性差异变化,但 SDF 含量相较未改性绿豆皮显著性增加($P<0.05$),相应的 IDF 含量则逐渐减少。由此可见,改性处理可使绿豆皮中部分 IDF 转化为 SDF,尤其是挤出-酶解复合改性处理的效果最明显。这可能是在挤压改性过程中 IDF 的一些糖苷键发生断裂,降解成 SDF,另一方面纤维素酶可能破坏了绿豆皮细胞壁的结构,从而有利于可溶性成分溶出,这与 Li 等^[21]得到的结果相似。

隙较多,出现不规则颗粒状物质(图 1c);经挤出-酶解复合改性处理的绿豆皮膳食纤维,表面变得很粗糙,大量的褶皱和孔隙连成一片,呈多层的疏松网状结构(图 1d)。这都为改性处理后的绿豆皮膳食纤维的持水力、持油力和膨胀力的增加提供了依据。樊红秀^[23]发现挤出改性处理后,人参膳食纤维的表面出现多层褶皱与较大多的孔隙,比表面积增大。Yu 等^[24]报道了通过不同改性方式处理胡萝卜渣 IDF 后,发现其比表面积增大,结构呈



注:(a)未改性绿豆皮膳食纤维:DF-1;(b)挤出改性绿豆皮膳食纤维:DF-2;(c)酶解改性绿豆皮膳食纤维:DF-3;(d)挤出-酶解复合改性绿豆皮膳食纤维:DF-4。下图表同。

图1 改性前后绿豆皮膳食纤维的扫描电子显微镜图

Fig.1 Scanning electron microscope (SEM) images of dietary fiber in mung bean skin before and after modification

疏松多孔状致使持水力增强。上述研究发现均与本文的结果很相似。

2.3 X射线衍射扫描结果

纤维素在固态下有天然纤维素I、人造纤维素II、III、IV和X 5种结晶构型。图2为改性前后绿豆皮膳食纤维的X射线衍射谱图,可以看出在 2θ 为 16.8° 和 22.4° 左右时有明显的结晶衍射峰,且在 34.8° 处有一个较弱的衍射峰,具有典型的纤维素I晶体构型^[25]。未经改性的绿豆皮膳食纤维的 2θ 为 16° 和 22° 时出现固有的衍射峰,经挤出改性、酶解改性和挤出-酶解复合改性后的 2θ 分别为 16.77° , 16.83° , 16.88° 和 22.42° , 22.38° , 22.46° ,差异不明显,这说明改性处理并没有使绿豆皮膳食纤维的结晶构型发生显著性改变。改性处理后的绿豆皮膳食纤维结晶区的峰高以及峰面积均有所下降,说明相对结晶度均有不同程度的降低。Jade 7.0 软件拟合后发现,经挤出改性、酶解改性和挤出-酶解复合改性后绿豆皮膳食纤维的相对结晶度分别为 37.56% , 36.88% , 35.17% ,相比未改性处理的 42.55% ,相对结晶度分别降低了 11.73% , 13.33% , 17.34% 。这是由于上述3种改性处理过程中,绿豆皮膳食纤维部分结晶区结构和非结晶区的结构被破坏,分子聚合力降低,使这些结构组分溶出或转化为水溶性成分溶出,一些结晶区转变为非定性区,相对结晶度降低,从而有利于降低绿豆皮膳食纤维的聚合度,导致绿豆皮膳食纤维的持水力、持油力、膨胀力等功能特性的变化^[26]。

2.4 傅里叶变换红外光谱扫描结果

改性处理后的绿豆皮膳食纤维与未改性处理的膳食纤维的傅里叶变换红外光谱分布很相似,

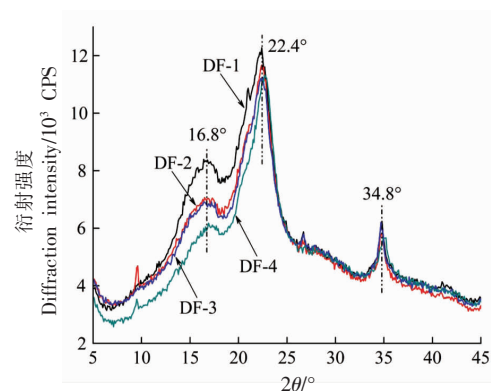


图2 改性前后绿豆皮膳食纤维的X射线衍射谱图

Fig.2 X-ray diffraction spectra of dietary fiber in mung bean skin before and after modification

但在相应的波数下吸收强度稍有差异。如图3所示,绿豆皮膳食纤维有典型的多糖类特征吸收峰。在 3362 cm^{-1} 处出现较强而宽的圆滑吸收峰,这是半纤维素和纤维素的-OH伸缩振动吸收峰,挤出改性、酶解改性和挤出-酶解复合改性处理后吸收峰强度都稍有减弱,这可能是改性处理过程中纤维素分子间的氢键断裂所致^[27],有利于绿豆皮膳食纤维形成多孔结构,持水力增强。 2922 cm^{-1} 处的小尖峰是多糖亚甲基和甲基的-CH拉伸振动吸收峰所致;在 1642 cm^{-1} 处的吸收峰是酯类C=O的非对称伸缩振动吸收峰, 1317 cm^{-1} 处的吸收峰是木质素强组分的拉伸或弯曲特征吸收峰,经上述3种改性处理后所对应的特征吸收峰值都稍有减小,这充分说明改性处理后绿豆皮膳食纤维中木质素含量减少,可能是由于经过改性处理后,一些木质素被降解,转化为SDF^[28]; 1039 cm^{-1} 处的较强吸收峰是糖环中醚键(C-O-C)伸缩振动的特征

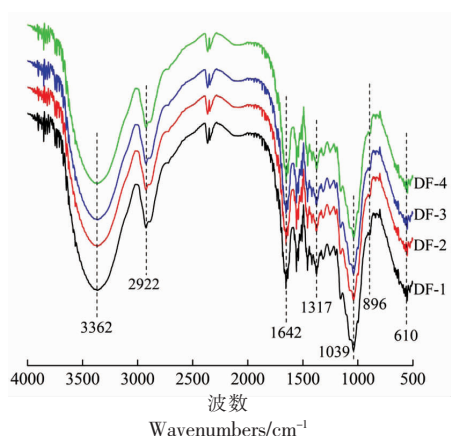


图 3 改性前后绿豆皮膳食纤维的傅里叶变换红外光谱图

Fig.3 Fourier transform infrared spectra of dietary fiber in mung bean skin before and after modification

峰^[29]。896 cm^{-1} 处的弱小尖峰是糖单元中 β -型吡喃糖的伸缩振动吸收峰, 经过上述 3 种改性处理后吸收峰稍有轻微增强, 说明改性处理可使糖单元的连接键断裂。610 cm^{-1} 处的弱小吸收峰由 α -型吡喃糖环的环伸缩振动引起的。上述表明, 3 种改性处理绿豆皮膳食纤维的傅里叶变换红外光谱特征吸收峰的强度有着明显的变化, 使各纤维素组分得到重新分布, 部分 IDF 向 SDF 转化。

2.5 膳食纤维的理化性质分析

表 2 膳食纤维的理化性质

Table 2 Physiochemical properties of dietary fiber

组别	持水力/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	持油力/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	膨胀力/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	阳离子交换能力/ $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$
DF-1	6.97 ± 0.32^a	4.93 ± 0.10^a	4.79 ± 0.11^a	0.47 ± 0.02^a
DF-2	8.73 ± 0.15^b	5.31 ± 0.14^b	6.41 ± 0.15^{bc}	2.28 ± 0.16^b
DF-3	8.90 ± 0.11^b	5.48 ± 0.16^b	5.84 ± 0.22^b	2.03 ± 0.06^b
DF-4	10.21 ± 0.18^c	5.67 ± 0.11^b	8.95 ± 0.23^c	3.28 ± 0.13^c

注: 同一列肩标不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.6 吸附葡萄糖能力分析

如图 4 所示, 3 种改性处理绿豆皮膳食纤维对葡萄糖的吸附能力均有显著性提升 ($P < 0.05$), 且在吸附 12 h 后基本达到吸附平衡。在吸附平衡时, DF-2、DF-3、DF-4 对葡萄糖的吸附能力分别由 DF-1 的 (8.37 ± 0.18) mmol/g 增加到 (11.34 ± 0.24) mmol/g , (11.06 ± 0.13) mmol/g , (13.89 ± 0.14) mmol/g , 即分别是 DF-1 的 1.35, 1.32, 1.66 倍。这可能是由于具有黏性的 SDF 将葡萄糖进行包裹

如表 2 所示, 改性处理对绿豆皮膳食纤维的持水力、持油力、膨胀力及阳离子交换能力均具有显著性的改善作用, 其中, 挤出-酶解复合改性处理的效果最好。DF-2、DF-3、DF-4 的持水力分别是 DF-1 的 1.25, 1.28, 1.46 倍; DF-2、DF-3、DF-4 的持油力分别是 DF-1 的 1.08, 1.11, 1.15 倍; DF-2、DF-3、DF-4 的膨胀力分别是 DF-1 的 1.34, 1.22, 1.87 倍; DF-2、DF-3、DF-4 的阳离子交换能力分别是 DF-1 的 4.85, 4.32, 6.98 倍。这是由于在改性处理过程中, 绿豆皮膳食纤维表面出现多层褶皱与较大多的孔隙, 比表面积增大, 有助于更多的亲水基团和亲油基团暴露出来^[30], 这使与水和油结合的位点增多, 水和油则可以更好地渗透到绿豆皮膳食纤维内部与之结合。另一方面, 改性处理也会对绿豆皮膳食纤维中的大分子成分产生一定的破坏作用, 使一部分转变为小分子的可溶性成分, 有利于持水力、持油力及膨胀力的提高^[31]。阳离子交换能力的大小与绿豆皮膳食纤维中的糖醛酸含量密切相关^[32], 改性处理后的绿豆皮膳食纤维的阳离子交换能力均增强, 可能是由于改性处理过程中也把绿豆皮膳食纤维中部分糖醛酸基团暴露出来。这些发现与牛希等^[33]采用超声改性处理燕麦膳食纤维得到的结果类似。

与束缚, 从而把葡萄糖分子截留^[34], 这与表 1 中绿豆皮经过改性处理后 SDF 含量显著高于改性前 SDF 含量结果相符。

2.7 吸附胆固醇能力分析

如图 5 所示, 在 $\text{pH}=2$ (模拟胃部环境) 和 $\text{pH}=7$ (模拟小肠内环境) 条件下, 未改性和 3 种改性处理后的绿豆皮膳食纤维对胆固醇的吸附能力均随时间的延长呈逐渐上升趋势, 在 12 h 时基本达到吸附平衡。在相同 pH 值条件下, 改性处理后绿豆

皮膳食纤维的吸附胆固醇能力均显著高于改性前 ($P < 0.05$)。在 3 种改性处理绿豆皮膳食纤维中, DF-4 对胆固醇的吸附能力最优, 在吸附平衡时, DF-4 在 pH=2 和 pH=7 条件下对胆固醇的吸附能力分别达到 $(2.38 \pm 0.05) \text{ mg}/(\text{mL} \cdot \text{g})$ 和 $(3.45 \pm 0.12) \text{ mg}/(\text{mL} \cdot \text{g})$ 。出现这种现象可能是由于 SDF 较 IDF 分子质量小, 极性基团较多, 更易于吸附胆固醇^[13], 这也与表 1 中绿豆皮经过改性处理后 SDF 含量

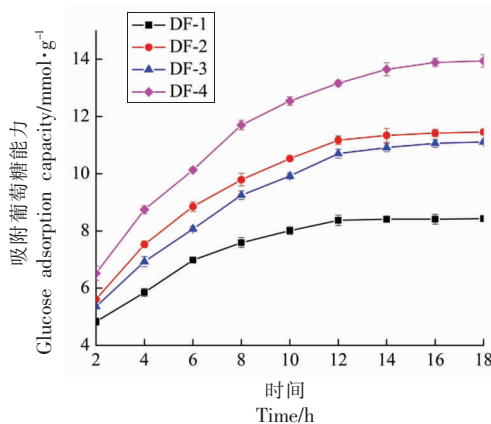


图4 改性前后绿豆皮膳食纤维的吸附葡萄糖能力
Fig.4 Glucose adsorption capacity of dietary fiber in mung bean skin before and after modification

3 结论

本试验研究了改性处理(挤出改性、酶解改性和挤出-酶解复合改性)对绿豆皮膳食纤维结构及功能特性(持水力、持油力、膨胀力、阳离子交换能力、吸附葡萄糖能力、吸附胆固醇能力)的影响。结果表明, 3 种改性处理方式均有利于提高绿豆皮中 SDF 的含量, 其中挤出-酶解复合改性的效果最佳。X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱结果显示, 各峰强度发生不同程度的改变, 这是由于膳食纤维部分结晶区和木质素、纤维素等非结晶区的结构被破坏, 一些结晶区转变为非定性区, 进而使相对结晶度降低, 从而将导致理化特性的变化。绿豆皮膳食纤维经上述 3 种改性处理后, 表面微观结构均由光滑致密变成不同程度的粗糙与蓬松, 出现了多孔性特征或多层褶皱, 比表面积大幅度增大。这种改变有利于绿豆皮膳食纤维中更多的亲水基团和亲油基团暴露出来, 使持水力、持油力、膨胀力、阳离子交换能力、吸附葡萄糖能力及吸附胆固醇能力等功能特性得到显著改善。通过

显著高于改性前的结果相一致。Sera 等^[35]研究发现, 环境 pH 值对胆固醇的吸附影响较大, 从图 5 可以看出, 同一种绿豆皮膳食纤维, 其在 pH=7 时的吸附胆固醇能力要优于 pH=2。此外, 膳食纤维的表面微观结构也在一定程度上影响其吸附胆固醇能力, 胆固醇被膳食纤维吸附的过程是一种物理吸附, 改性处理后的绿豆皮膳食纤维的表面出现更多褶皱和孔隙, 更加有利于吸附胆固醇。

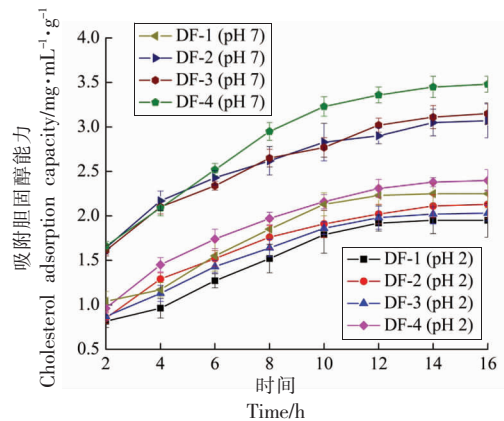


图5 改性前后绿豆皮膳食纤维的吸附胆固醇能力
Fig.5 Cholesterol adsorption capacity of dietary fiber in mung bean skin before and after modification

对 3 种改性处理方式进行分析与比较, 挤出-酶解复合改性后的绿豆皮膳食纤维, 其持水力、持油力、膨胀力、阳离子交换能力等功能特性均为最佳。本研究结果可为改善绿豆皮膳食纤维的结构、功能特性及其广泛应用于功能食品加工中奠定一定的理论基础, 对提高绿豆资源的附加值, 延长绿豆精深加工产业链具有重要意义及市场前景。

参 考 文 献

- [1] 王大为, 董欣, 张星, 等. 不同浸泡方法对绿豆吸水特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 83-89. WANG D W, DONG X, ZHANG X, et al. Effects of different soaking methods on water absorption characteristics of mung bean [J]. Food Science, 2017, 38(13): 83-89.
- [2] SCHREINEMACHERS P, SEQUEROS T, RANI S, et al. Counting the beans: quantifying the adoption of improved mungbean varieties in South Asia and Myanmar[J]. Food Security, 2019, 11(3): 623-634.

- [3] 李良玉, 刘晚霞, 李朝阳, 等. 绿豆抗性糊精的高效纯化技术及分子特性研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 134-141.
LI L Y, LIU W X, LI C Y, et al. High efficient purification technique and molecular characteristics of the *Phaseolus radiates* L. resistant dextrin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(10): 134-141.
- [4] NOBLE T, TAO Y, MACE E, et al. Characterization of linkage disequilibrium and population structure in a mungbean diversity panel[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 8(1): 1-9.
- [5] POUTANEN K S, FISZMAN S, MARSAUX C F, et al. Recommendations for characterization and reporting of dietary fibers in nutrition research[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2018, 108(3): 437-444.
- [6] 陶春生, 王克俭, 谷渤海. 挤压改性麦麸膳食纤维对饺子皮品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 172-176.
TAO C S, WANG K J, GU B H. Effects of extruded modified wheat bran dietary fiber on quality of dumpling wrapper[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(1): 172-176.
- [7] CASSIDY Y M, MCSORLEY E M, ALLSOPP P J. Effect of soluble dietary fibre on postprandial blood glucose response and its potential as a functional food ingredient[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 46: 423-439.
- [8] ULLAH I, YIN T, XIONG S. Effects of thermal pre-treatment on physicochemical properties of nano-sized okara (soybean residue) insoluble dietary fiber prepared by wet media milling[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 18-26.
- [9] 刘婷婷, 戴龙, 王庆庆, 等. 香菇柄纤维挤出低聚化作用及工艺优化[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 11-17.
LIU T T, DAI L, WANG Q Q, et al. Optimization of extrusion parameters for improved oligomerization of lentinula edodes handle fiber[J]. Food Science, 2014, 35(16): 11-17.
- [10] 张海芳, 李艳, 韩育梅, 等. 酶法改性对马铃薯渣膳食纤维单糖组分及理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 60-66.
ZHANG H F, LI Y, HAN Y M, et al. Effects of different enzymatic modifications on monosaccharide composition and physicochemical properties of dietary fiber from potato pulp[J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 60-66.
- [11] 周爱丽. 绿豆皮膳食纤维挤出改性工艺优化及其表征[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 109-113.
ZHOU A L. Optimization of extrusion modification process for green bean skin dietary and its characterization[J]. Food Research And Development, 2016, 37(23): 109-113.
- [12] 朱玉, 郭利娜, 楚佳希, 等. 酶法改性对小米糠膳食纤维体外胆固醇吸附活性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 211-216.
ZHU Y, GUO L N, CHU J X, et al. Effect of enzymatic treatment on cholesterol-binding capacity of dietary fiber from millet bran[J]. Food Science, 2015, 36(19): 211-216.
- [13] 王大为, 赵鑫, 董欣, 等. 发芽对绿豆皮膳食纤维结构及性质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 111-117.
WANG D W, ZHAO X, DONG X, et al. Effect of germination on the structure and properties of dietary fiber in mung bean skin[J]. Food Science, 2016, 37(23): 111-117.
- [14] MUNEER F, JOHANSSON E, HEDENQVIST M S, et al. The impact of newly produced protein and dietary fiber rich fractions of yellow pea (*Pisum sativum* L.) on the structure and mechanical properties of pasta-like sheets[J]. Food Research International, 2018, 106: 607-618.
- [15] LIU H C, FAN H X, ZHANG J, et al. Isolation, purification, structural characteristic and antioxidative property of polysaccharides from *A. cepa* L. var. *agrogatum* Don[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(1): 71-79.
- [16] WANG L, ZHANG B, XIAO J, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127-135.
- [17] CHEN Y, YE R, YIN L, et al. Novel blasting extrusion processing improved the physicochemical properties of soluble dietary fiber from soybean residue and *in vivo* evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 1-8.
- [18] CHAU C F, CHEUNG P C K. Effects of the physico-chemical properties of three legume fibers on

- cholesterol absorption in hamsters[J]. Nutrition Research, 1999, 19(2): 257-265.
- [19] PEERAJIT P, CHIEWCHAN N, DEVAHASTIN S. Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1891-1898.
- [20] ZHANG N, HUANG C, OU S. *In vitro* binding capacities of three dietary fibers and their mixture for four toxic elements, cholesterol, and bile acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 236-239.
- [21] LI H, LONG D, PENG J, et al. A novel *in-situ* enhanced blasting extrusion technique-Extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 80-88.
- [22] JIA M, CHEN J, LIU X, et al. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 468-474.
- [23] 樊红秀. 高品质人参膳食纤维制取工艺优化及其功能特性的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013: 39-42.
- FAN H X. Studies on the process optimization and functional characteristics of high quality ginseng dietary fiber[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013: 39-42.
- [24] YU G, BEI J, ZHAO J, et al. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. *Sativa* Hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 333-340.
- [25] KHAWAS P, DEKA S C. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from culinary banana peel using high-intensity ultrasonication combined with chemical treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 608-616.
- [26] LIN Y, WANG H, RAO W, et al. Structural characteristics of dietary fiber (*Vigna radiata* L. hull) and its inhibitory effect on phospholipid digestion as an additive in fish floss[J]. Food Control, 2019, 98: 74-81.
- [27] CHU J, ZHAO H, LU Z, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. Food Chemistry, 2019, 294(11): 79-86.
- [28] ZHAO X, CHEN J, CHEN F, et al. Surface characterization of corn stalk superfine powder studied by FTIR and XRD[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 104: 207-212.
- [29] ZHANG W, ZENG G, PAN Y, et al. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172: 102-112.
- [30] AL-SHERAJI S H, ISMAIL A, MANAP M Y, et al. Functional properties and characterization of dietary fiber from *Mangifera pajang* Kort. fruit Pulp[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(8): 3980-3985.
- [31] CHEN J, GAO D, YANG L, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. Food Research International, 2013, 54(2): 1821-1827.
- [32] SANDHU D K, JOSHI V K. Solid state fermentation of apple pomace for concomitant production of ethanol and animal feed[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 1997, 56(2): 86-90.
- [33] 牛希, 史乾坤, 赵城彬, 等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 130-136.
- NIU X, SHI Q K, ZHAO C B, et al. Effect of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber[J]. Food Science, 2020, 41(23): 130-136.
- [34] OU S, KWOK K, LI Y, et al. *In vitro* study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 1026-1029.
- [35] SERA N, MORITA K, NAGASOE M, et al. Binding effect of polychlorinated compounds and environmental carcinogens on rice bran fiber[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2005, 16(1): 50-58.

Effects of Modification on the Structure and Functional Properties of Dietary Fiber in Mung Bean Skin

Liu Hongcheng^{1,2}, Fan Hongxiu^{1,3}, Zhao Xin^{1,4}, Zhang Shanshan^{1,3}, Liu Tingting^{1,2*}, Wang Dawei^{1,2}

(¹College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118

²Scientific Research Base of Edible Mushroom Processing Technology Integration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130118

³Engineering Research Center of Grain Deep-processing and High-efficiency Utilization of Jilin Province, Changchun 130118

⁴Key Laboratory of Technological Innovations for Grain Deep-processing and High-efficiency Utilization of By-products of Jilin Province, Changchun 130118)

Abstract The dietary fiber in mung bean skin was used as an experimental object in this experiment. In order to improve functional properties of dietary fiber in mung bean skin, we examined the effect of extrusion and/or enzymatic hydrolysis treatment on water holding capacity, oil holding capacity, swelling capacity, cation exchange capacity, glucose adsorption capacity and cholesterol adsorption capacity of skin dietary fiber in mung bean. We also investigated the effect on structural properties of dietary fiber in mung bean skin by scanning electron microscope, X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy. The results showed that the combined treatment could more significantly modify the properties of dietary fiber in mung bean skin than either treatment alone. Compared with the dietary fiber in mung bean skin before and after modification, the water holding capacity, oil holding capacity, swelling capacity, cation exchange capacity and glucose adsorption capacity were enhanced by 1.46, 1.15, 1.87, 6.98 and 1.66 times in the combined treatment group, respectively. The cholesterol adsorption capacity was (2.38 ± 0.05) mg/(mL·g) at pH 2, and (3.45 ± 0.12) mg/(mL·g) at pH 7. The results of scanning electron microscope analysis indicated that the surface structure of dietary fiber in mung bean skin after combined treatment was loose, and more wrinkles and porous characteristics appeared. X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy analysis indicated that the relative crystallinity of dietary fiber in mung bean skin after combined treatment was the lowest, and some cellulose components were redistributed to transform into soluble dietary fiber (SDF). Therefore, extrusion combined with enzymatic hydrolysis treatment can be used as a better method to modify dietary fiber, providing theoretical basis for improving the utilization rate of dietary fiber in mung bean skin and further exploiting its nutritional value.

Keywords extrusion combined with enzymatic hydrolysis treatment; mung bean skin; dietary fiber; structure; functional properties