

碱性过氧化氢处理对藕渣不溶性膳食纤维结构及功能特性的影响

张倩, 王佩瑶, 王子成, 黄琳茜, 何玲, 徐磊*
(淮阴工学院 生命科学与食品工程学院 江苏淮安 223003)

摘要 采用碱性过氧化氢(AHP)处理藕渣,比较处理前、后藕渣不溶性膳食纤维(IDF)结构和功能特性的变化。结果表明:AHP处理后藕渣 IDF的D-葡萄糖质量分数显著增加了9.52%($P<0.05$),而其它单糖含量均显著降低($P<0.05$)。扫描电子显微镜分析表明,AHP处理后的IDF结构蓬松,表面起皱并出现解离断裂。X-射线衍射发现AHP处理后IDF晶体结构虽未发生改变,但衍射强度由13.09%增加至16.13%($P<0.05$)。傅里叶红外光谱分析表明,AHP处理后IDF的部分官能团发生变化,特征峰减弱或消失。热重分析发现AHP处理后IDF热解峰值温度降低,质量残留率从10.43%提高到15.94%($P<0.05$)。AHP处理后IDF的持水力、持油力、胆固醇吸附能力、 Cu^{2+} 吸附能力和阳离子交换能力均显著提高($P<0.05$),亚硝酸钠吸附能力未发生显著变化($P>0.05$),而膨胀力显著降低($P<0.05$)。综上,AHP处理使藕渣IDF的结构发生变化,功能性质得到改善。

关键词 碱性过氧化氢;藕渣;不溶性膳食纤维;结构;功能特性

文章编号 1009-7848(2024)02-0053-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.005

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn),一种莲科多年生蔬菜,在我国种植规模较大,具有重要的经济价值^[1]。莲藕富含淀粉、膳食纤维(Dietary fiber, DF)、蛋白质、氨基酸、还原糖、矿物质、酚类和维生素等多种营养物质^[2]。研究发现,莲藕具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、减肥和抗糖尿病等多种生理作用^[3-4]。目前,在我国有超过20%的莲藕被用于藕片、藕粉、藕汁和藕醋等的生产加工,在生产过程中产生大量的藕节、藕渣等废料,除少量被用作饲料,大部分被废弃,一定程度上造成了莲藕资源的浪费,约束了其经济价值的提升^[2]。研究表明,藕渣保留了莲藕的许多功能性成分,尤其含有丰富的DF,对其进行综合利用,一方面可以提高莲藕种植的经济效益,另一方面也可以拓宽食品和药品行业原材料的来源^[5]。

DF是一种在植物中发现的碳水化合物聚合物,它虽难以消化和吸收,但是人类饮食的重要组成部分,也是肠道微生物群落的重要基质^[6]。根据DF其水溶性可分为可溶性膳食纤维(Soluble di-

etary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)。虽然DF的主要部分为IDF,但是通常情况下IDF的物理和生理活性弱于SDF。为了充分利用DF,对IDF进行一定的改性,被认为是一种有效的营养提升策略^[7]。研究表明,酶^[8]、发酵^[9]、物理^[10]和化学^[11]等手段可以改变IDF的结构,提高其物理和生理活性。碱性过氧化氢(Alkaline hydrogen peroxide, AHP)为一种经典的木质纤维素预处理方法,可以降低木质纤维素抗酶水解能力,从而提高其生物利用度^[12]。在AHP处理过程中只产生氧气和水,不会造成二次污染。目前,AHP被用于处理荞麦秸秆^[13]和人参渣^[7]来源的IDF,结果表明:AHP处理改变了IDF的理化和功能特性。然而,AHP处理对藕渣IDF结构和功能特性的影响尚未有报道。

本研究以藕渣为原料,采用AHP法制备IDF,测定IDF的持水力、持油力、膨胀力、吸附性等功能性质,分析单糖组成、微观结构、红外光谱、X-射线衍射图谱和热稳定性,以探究AHP处理对藕渣IDF的功能及结构特性的影响,为藕渣DF的开发利用提供参考。

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801581);江苏省大学生创新创业训练计划资助项目(202211049091Y, 202211049427YJ)

第一作者: 张倩,女,硕士生

通信作者: 徐磊 E-mail: dapangxulei@163.com

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

藕渣为本实验室自制。新鲜莲藕购自当地农

贸市场,将莲藕切成碎丁,加入去离子水后置于高速组织捣碎机中打浆,然后采用双层纱布过滤除去淀粉,将滤渣于45℃烘箱干燥24h,粉碎过100目筛后备用。

α -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶、单糖标准品,美国Sigma-Aldrich公司;碱性蛋白酶,丹麦Novozymes公司;过氧化氢、HCl、NaOH、乙醇、冰乙酸等,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要设备及仪器

ICS3000离子色谱仪,美国Dionex公司;SU8010型场发射扫描电镜,日本日立高新技术公司;Scientific Nicolet iS5型红外光谱仪,美国Thermo公司;Smartlab 9KW型X-射线衍射,日本理学株式会社;STA449F3同步热分析仪,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 藕渣的AHP处理 准确称取藕渣100g,按料液比1:15加入1%过氧化氢溶液,采用1mol/L NaOH溶液调节pH值至11.0,然后于60℃水浴搅拌反应2h。待反应结束后,用1mol/L HCl溶液调节pH值至7.0,按体积比1:3加入95%乙醇,4000r/min离心10min收集沉淀,将沉淀于45℃烘箱干燥24h,粉碎过100目筛,得到AHP处理藕渣。

1.3.2 藕渣IDF的制备 称取藕渣100g,按料液比1:15加入去离子水,调节pH值至8.2,充分搅拌后加入0.5mL α -淀粉酶,95℃反应30min。待悬浮液冷却到60℃后,加入0.5mL碱性蛋白酶,反应30min后调节pH值至4.5,接着加入0.1mL淀粉葡萄糖苷酶,反应30min。反应结束后,沸水浴灭酶,待悬浮液冷却至室温,离心收集沉淀,于45℃烘箱干燥24h,粉碎过100目筛,得IDF。

1.3.3 单糖组成测定 参照Liu等^[14]的方法,采用离子色谱法分析藕渣IDF的单糖组成。准确称取0.2g IDF,加入2mL浓硫酸,混匀后反应1h,接着加入56mL去离子水,密封后于121℃反应2h,待冷却后用CaCO₃中和硫酸,然后于10000r/min离心20min。上清液过0.22 μ m滤膜后进行上样分析,液相系统采用CarboPac PA-1(4mm \times 250mm)色谱柱,流动相为0.025mol/L NaOH溶

液,控制流速为0.25mL/min,柱温为30℃。

1.3.4 扫描电子显微镜分析 取适量藕渣IDF,采用导电胶带固定后用真空溅射镀金,然后置于扫描电子显微镜下观察。测试加速电压为15kV,放大倍数分别为500和10000。

1.3.5 傅里叶红外光谱分析 取适量藕渣IDF,按1:100的比例加入KBr,充分研磨粉碎后压成透明薄片,然后放入傅里叶红外光谱仪中扫描,波数范围为400~4000cm⁻¹。

1.3.6 X-射线衍射分析 取适量藕渣IDF,均匀铺展于样品槽中,压平后在X-射线衍射仪上进行扫描,试验条件:靶型为Cu-K α 靶,扫描范围(2 θ)为5°~60°,扫描速度为5°/min。

1.3.7 热重分析 称取5mg左右藕渣IDF置于坩埚中,以10℃/min的升温速度将样品从30℃加热到600℃,选择氮气作为保护气,控制流速为50mL/min。

1.3.8 理化性质测定

1.3.8.1 持水力的测定 准确称取0.2g IDF(m_0)于10mL离心管中,加入6mL去离子水,振荡均匀,室温下静置24h后于4000r/min离心10min,弃去上清液,用滤纸吸干管壁残余水滴,分别记录空离心管质量(m_1)和吸水后样品和离心管总质量(m_2),按式(1)计算持水力。

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

1.3.8.2 持油力的测定 准确称取0.2g IDF(m_0)于10mL离心管中,加入6mL玉米油,振荡均匀,室温下静置24h后于4000r/min离心10min,弃去上清液,用滤纸吸干管壁残余油滴,分别记录空离心管质量(m_1)和吸油后样品和离心管总质量(m_2),按式(2)计算持油力。

$$\text{持油力}(\text{g/g})=(m_2-m_1)/m_0 \quad (2)$$

1.3.8.3 膨胀力的测定 准确称取0.2g IDF(m)于10mL离心管中,记录干样体积(V_1),加入6mL去离子水,搅拌均匀,室温下静置24h,记录膨胀后样品体积(V_2)。

$$\text{膨胀力}(\text{mL/g})=(V_2-V_1)/m \quad (3)$$

1.3.9 吸附性能测定

1.3.9.1 亚硝酸钠吸附能力测定 参考Zhang等^[15]的方法并略作修改,准确称取0.3g IDF于100mL锥形瓶中,加入30mL 100 μ mol/L NaNO₂溶

液,然后调节体系 pH 值至 7.0,在 37 °C 摇床中恒温振荡 2 h,离心取上清液,采用盐酸萘乙二胺法在波长 550 nm 波长处测定吸光度,并以亚硝酸钠为标准品绘制标准曲线。

1.3.9.2 胆固醇吸附能力测定 参照陈致印等^[16]的方法进行胆固醇吸附能力的测定,略作修改。准确称取 IDF 0.3 g 于 100 mL 锥形瓶中,加入 8 mL 冰乙酸饱和 2 h,然后加入 20 mL 0.5 mg/mL 的胆固醇溶液。将上述溶液置于 25 °C 摇床中,以 200 r/min 振荡 1.5 h,然后于 4 000 r/min 离心 10 min。取上清液稀释 5 倍,采用邻苯二甲醛法在波长 550 nm 处测定吸光度值,并以胆固醇为标准品绘制标准曲线。

1.3.9.3 Cu²⁺吸附能力测定 参照 Zheng 等^[11]的方法,准确称取 0.2 g IDF 于 100 mL 锥形瓶中,加入 25 mL 4 mg/mL 的 CuSO₄ 溶液,于 37 °C 摇床中以 160 r/min 振荡 24 h,然后于 4 000 r/min 离心 10 min。采用碘量法测定上清液中 Cu²⁺的含量,并以未吸附前的 CuSO₄ 溶液作为对照。

1.3.10 阳离子交换能力测定 参照万仁口等^[17]的方法,准确称取 1 g IDF 于 100 mL 锥形瓶中,加入 20 mL 0.1 mol/L 的 HCl 溶液,充分搅拌后密封静置 12 h。过滤悬浮液,将滤渣用蒸馏水反复冲洗直至滤液中不含 Cl⁻(10% AgNO₃ 作指示剂),然后向滤渣中加入 100 mL 5% NaCl 溶液,搅拌混匀 30 min,用 0.01 mol/L NaOH 溶液滴定(酚酞作为指示剂),并以去离子水代替 HCl 做空白试验。

1.4 数据分析

每组试验至少重复测定 3 次,使用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示显著性差异,并用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 藕渣 IDF 的单糖组成

AHP 处理对藕渣 IDF 的单糖组成的影响如表 1 所示。未处理 IDF 主要由 8 种单糖组成,其中 *D*-葡萄糖、半乳糖醛酸和 *D*-半乳糖质量分数较高,而 *D*-木糖、*L*-阿拉伯糖和 *L*-鼠李糖质量分数较低。刘恩超等^[18]报道称藕皮、藕节和藕食用部位多糖均主要由 *D*-葡萄糖和 *D*-半乳糖构成。纤维素主要由葡萄糖单元聚合而成,果胶主要由半乳糖醛酸和 *D*-半乳糖等构成,而半纤维素则由多种单糖混聚而成^[19],与本研究结果相符。由此可以看出,藕渣 IDF 主要由纤维素和果胶类物质构成。与未处理 IDF 相比,经 AHP 处理后,*D*-木糖和 *L*-阿拉伯糖在 IDF 中未检出,*D*-葡萄糖质量分数增加了 9.52% ($P < 0.05$),而其它单糖质量分数均显著降低 ($P < 0.05$)。AHP 处理后 *D*-葡萄糖质量分数增加而其它单糖质量分数降低可归因于处理过程中果胶、半纤维素的溶解,从而提高了藕渣 IDF 中纤维素的比。在碱性 pH 值下,过氧化氢不稳定,可以形成超氧和羟自由基,导致藕渣 DF 的部分降解^[7]。Meng 等^[13]在采用 AHP 法处理荞麦秸秆 IDF 过程中也报道了显著提高的 *D*-葡萄糖含量。

表 1 藕渣 IDF 的单糖组成

Table 1 Monosaccharide compositions of insoluble dietary fiber from lotus root residue

样品	质量分数/%							
	<i>D</i> -甘露糖	<i>L</i> -鼠李糖	葡萄糖醛酸	半乳糖醛酸	<i>D</i> -葡萄糖	<i>D</i> -半乳糖	<i>D</i> -木糖	<i>L</i> -阿拉伯糖
未处理	2.86 ± 0.18 ^a	0.14 ± 0.01 ^a	1.21 ± 0.12 ^a	18.87 ± 0.37 ^a	71.03 ± 0.68 ^b	5.38 ± 0.24 ^a	0.26 ± 0.01 ^a	0.26 ± 0.02 ^a
	AHP 处理	2.21 ± 0.11 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	0.88 ± 0.09 ^b	15.76 ± 0.12 ^b	77.79 ± 0.90 ^a	3.31 ± 0.13 ^b	-

注:同列中不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$),下同。

2.2 藕渣 IDF 微观结构

利用 SEM 对 AHP 处理前、后的藕渣 IDF 微观结构进行观察,结果如图 1 所示。未处理 IDF 的结构紧凑、完整,表面较光滑,整体呈团块状(图

1a、1b), 而经 AHP 处理后 IDF 的致密结构被破坏,呈现疏松多层的蓬松结构,表面起皱并出现解离断裂,碎片尺寸减小(图 1c、1d)。藕渣 IDF 结构的变化可归因于 AHP 的促进半纤维素降解和脱

木质素作用^[20]。Meng等^[13]在采用AHP方法提取荞麦秸秆IDF时也发现了类似的现象。AHP处理后藕渣IDF增大的表面积,此可在一定程度上促进其功能性质的提高。

2.3 藕渣IDF的红外光谱分析

AHP处理前后、藕渣IDF的FTIR如图2所示,AHP处理后未出现明显的新的化学基团。IDF在 3385 cm^{-1} 和 3386 cm^{-1} 附近的宽吸收峰可归因于O-H的伸缩振动,主要来自半纤维素和纤维素。 2916 cm^{-1} 和 2913 cm^{-1} 附近出现的较弱吸收峰,这是由多糖的甲基和亚甲基的C-H伸缩振动所引起。未处理IDF在 1733 cm^{-1} 处出现一较弱吸收峰,是由酯类C=O的拉伸振动所引起,然而AHP处理后IDF此处的吸收峰消失,这可能是由于AHP处理时的氧化作用所致^[21]。Liu等^[14]在采用AHP法提取甘薯渣DF时也报道了类似的现象。此外, 1251 cm^{-1} 处的吸收峰可能与C-O的伸缩振动有关,然而,在AHP处理后此处的吸收峰明显减弱。在 1620 cm^{-1} 和 1616 cm^{-1} 附近的强吸收峰可归因于-COOH的伸缩振动。在 1058 cm^{-1} 处的吸收峰与C-O-C的伸缩振动有关,而在 896 cm^{-1} 处的吸收峰与 β -糖苷键的伸缩振动有关^[10]。以上FTIR结果表明AHP对藕渣IDF的改性作用主要是破坏纤维素、半纤维素和木质素的链内、链间的特定化学键。

2.4 藕渣IDF的X-射线衍射分析

采用X-射线衍射技术对藕渣IDF的晶体结构类型和结晶度进行表征,结果如图3所示。未处理IDF在 2θ 为 21.94° 处观察到一个尖锐的晶体衍射峰,在 2θ 为 15.43° 和 34.64° 处分别显示出较弱的晶体衍射峰,这表明未处理IDF呈现典型的纤维素I型晶体结构^[22]。研究表明,IDF的有序结晶区主要由纤维素构成,而无序非结晶区主要由非晶纤维素、半纤维素和木质素等组成^[23]。经AHP处理后藕渣IDF的衍射峰位置未发生变化,表明AHP处理未改变IDF的晶体类型。然而,所有衍射峰的强度均显著提高,经AHP处理后藕渣IDF的相对结晶度从13.09%增加到16.13%($P<0.05$),这可能是由于非晶形半纤维素、木质素等物质的降解所致^[24]。在AHP处理过程中藕渣IDF中化合物之间的分子链接会被打破,位于非结晶区的物质

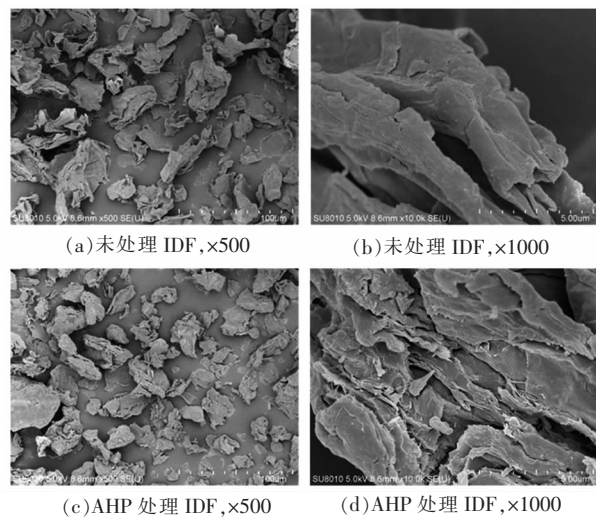


图1 藕渣IDF的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron microscopy of insoluble dietary fiber from lotus root residue

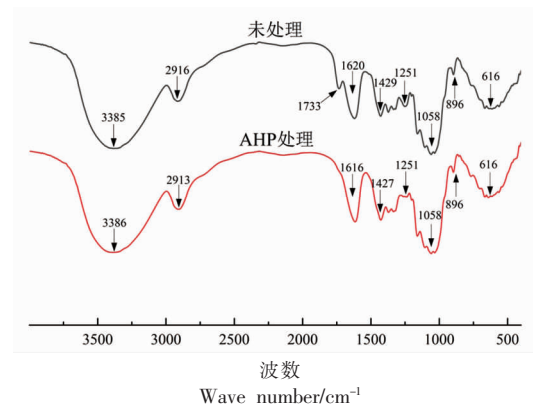


图2 藕渣IDF的红外光谱图

Fig.2 Fourier transform infrared spectra of insoluble dietary fiber from lotus root residue

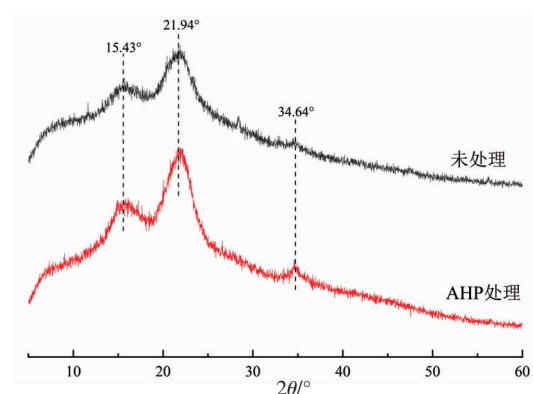


图3 藕渣IDF的X-射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction diagrams of insoluble dietary fiber from lotus root residue

更易被水解,从而提高结晶区域所占的比例。上述结果与 Jiang 等^[7]采用 AHP 处理人参 IDF 的结果吻合。

2.5 藕渣 IDF 热稳定性

采用热重分析法对藕渣 IDF 的热稳定性进行了分析,样品的热重(TG)和微商热重(DTG)曲线如图 4 所示。从 TG 曲线可以看出,AHP 处理前后藕渣 IDF 显示出相似的失重规律:第 1 阶段(50~150 °C),IDF 的质量缓慢降低,主要由亲水基团吸附的水分蒸发引起;第 2 阶段(150~400 °C),IDF 的质量迅速下降,主要与纤维素、半纤维素的降解相关;第 3 阶段(400~600 °C),IDF 的质量损失速率减慢,可归因于木质素和一些复杂聚合物的高温降解^[25]。最终,未处理 IDF 的质量残留率为 10.43%,显著低于 AHP 处理 IDF 的 15.94%($P < 0.05$)。这与 X-射线衍射的结果相一致,AHP 处理后 IDF 拥有较高的结晶度,分子链排列程度更有序,因而稳定性更好。Zhang 等^[26]研究也发现,采用 AHP 法从桔皮中回收的柑橘纤维具有更高的热稳定性。从 DTG 曲线可以看出,IDF 的热解区间在 AHP 处理后变窄,峰值温度从 324.39 °C 降低到 305.77 °C。AHP 处理提高了 IDF 的质量残留率,而降低了峰值热解温度,这一方面是由于 AHP 处理后 IDF 结构松散,在较低的温度下即可被降解,另一方面 AHP 处理后 IDF 的结晶度提高,热稳定性增强。

2.6 藕渣 IDF 的持水力、持油力和膨胀力

AHP 处理对藕渣 IDF 持水力、持油力和膨胀力的影响如表 2 所示。持水力主要表征材料在一定离心力条件下保持水分的能力^[27]。由表 2 可知,未处理 IDF 的持水力为 8.12 g/g,显著高于其它来源的 IDF($P < 0.05$),如荞麦秸秆^[13](4.97 g/g)和燕麦^[10](2.43 g/g)等。在 AHP 处理后藕渣 IDF 的持水力显著提高($P < 0.05$),较未处理时增加了 49.01%。未处理 IDF 的持油力为 4.50 g/g,显著高于其它来源的 IDF($P < 0.05$),如小麦(3.63 g/g)和刀豆^[27](2.43 g/g)等。与对持水力的影响类似,AHP 处理显著提高了藕渣 IDF 的持油力,较未处理时增加了 266.67%。产生上述结果可能是由于 AHP 处理使得藕渣 IDF 的结构更加蓬松,暴露了更多的亲水和亲油位点,从而增强水和油的物理截留能力。

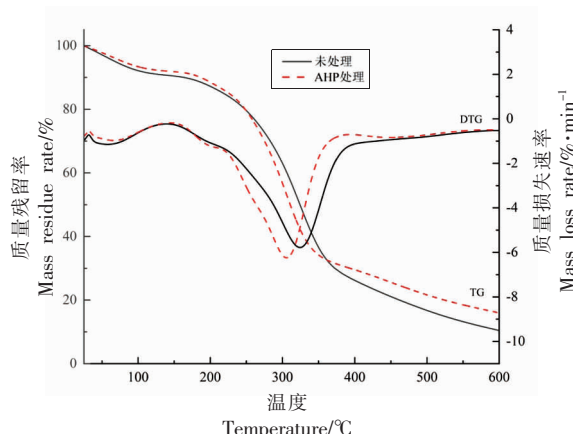


图 4 藕渣 IDF 的热重曲线图

Fig.4 Thermogravimetric curves of insoluble dietary fiber from lotus root residue

表 2 藕渣 IDF 的持水力、持油力和膨胀力

Table 2 Water holding capacity, oil holding capacity and swelling capacity of insoluble dietary fiber from lotus root residue

样品	持水力/ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	持油力/ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	膨胀力/ $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$
未处理	8.12 ± 0.28^b	4.50 ± 0.17^b	5.41 ± 0.10^a
AHP 处理	12.10 ± 0.41^a	16.50 ± 0.43^a	3.36 ± 0.08^b

在荞麦秸秆^[13]和人参^[7]的 AHP 处理研究中也观察到 IDF 显著增加的持水力和持油力。

膨胀力反应一定重量的干物质在过量溶剂中平衡后的体积变化,是一个与溶剂性质、物质结构等诸多因素相关的物理量^[28]。未处理 IDF 的膨胀力为 5.41 mL/g,在 AHP 处理后降低了 37.89%($P < 0.05$)。Meng 等^[13]发现 AHP 处理可以提高荞麦秸秆 IDF 的膨胀力,与本研究结论相反。这可能是由于 IDF 的来源不同所致,在本研究中 AHP 处理已使藕渣 IDF 形成了较为蓬松的结构,在加入水后进一步膨胀有限,因而较未处理 IDF 膨胀力降低。

2.7 藕渣 IDF 的吸附性能

AHP 处理对藕渣 IDF 亚硝酸钠、胆固醇和 Cu^{2+} 吸附能力的影响如表 3 所示。亚硝酸钠作为一种添加剂已被广泛用于多种腌肉制品中,可以赋予产品特征性风味和颜色,同时也可起到抑制某些细菌的作用^[29]。然而,在酸性条件下,亚硝酸根离子可与仲胺、酰胺等反应生成具有强烈致癌作用的 N-亚硝基化合物^[7]。研究发现 DF 对亚硝酸

盐具有一定的吸附能力,从而有助于降低亚硝酸盐对人类的毒性^[30]。未处理 IDF 的亚硝酸钠吸附能力为 0.86 mg/g,而 AHP 处理后未发生显著变化 ($P>0.05$)。这可能是由于一方面 AHP 处理使得 IDF 更加蓬松,可以吸附更多的亚硝酸根离子,另一方面 AHP 处理提高了 IDF 的表面负电荷密度,增强了对亚硝酸根离子的排斥。

胆固醇是心血管疾病的一个重要诱发因子,DF 的胆固醇吸附能力是评估其降血脂特性的重要指标^[31]。如表 3 所示,未处理 IDF 的胆固醇吸附能力为 12.26 mg/g,而 AHP 处理后显著增大 ($P<0.05$),较未处理时提高了 23.49%。经过 AHP 处理

后,藕渣 IDF 的表面更加粗糙,结构相对疏松,这可能为胆固醇提供更多的结合位点。

铜污染是威胁食品安全的严重问题,体内铜过量累积会导致肝硬化、腹泻和其它疾病^[32]。研究表明,DF 的羧基、羟基和酚酸等基团都对 Cu^{2+} 有较强的吸附能力,适当的化学和物理改性均可提高 DF 的 Cu^{2+} 吸附能力^[11]。未处理 IDF 的 Cu^{2+} 吸附能力为 85.12 mg/g,而 AHP 处理后显著提高 ($P<0.05$),较未处理时提高了 5.56%。AHP 处理后藕渣 IDF 结构变得疏松,以及引发的化学键解离,都可在一定程度上促进 IDF 对 Cu^{2+} 的捕获和吸附能力提高。

表 3 藕渣 IDF 的吸附性能

Table 3 Adsorption capacity of insoluble dietary fiber from lotus root residue

样品	亚硝酸钠吸附能力/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	胆固醇吸附能力/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	Cu^{2+} 吸附能力/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
未处理	0.86 ± 0.01^a	12.26 ± 0.23^b	85.12 ± 0.42^b
AHP 处理	0.84 ± 0.04^a	15.14 ± 0.15^a	89.85 ± 0.26^a

2.8 藕渣 IDF 的阳离子交换能力

AHP 处理前、后藕渣 IDF 的阳离子交换能力的变化如图 5 所示。未处理 IDF 的阳离子交换能力为 1.40 mmol/g,而 AHP 处理后显著提高 ($P<0.05$),较未处理时提高了 7.86%。DF 的侧链结构中含有的羧基、氨基和酚羟基基团都可以赋予其一定的弱酸性阳离子交换作用,摄入到机体后能起到保持肠道 pH 值稳定,控制离子浓度平衡,调节渗透压等作用^[33]。AHP 处理后,IDF 的比表面积

增大,分子内共价键断裂,使更多能进行阳离子交换的基团暴露出来,因而阳离子交换能力越强。

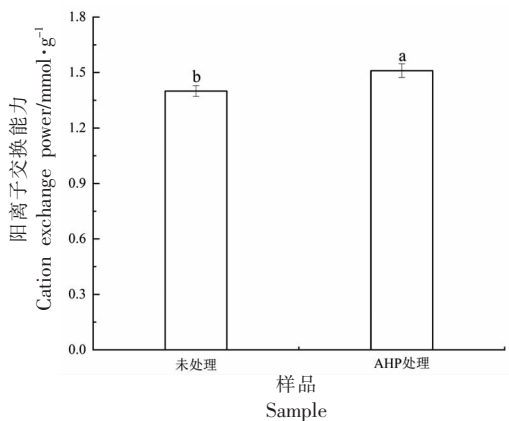
3 结论

经 AHP 处理后藕渣 IDF 的单糖组成发生变化,*D*-葡萄糖质量分数增加而其它单糖质量分数降低。藕渣 IDF 结构在 AHP 处理后变得更加疏松,FTIR 图谱中部分特征峰消失或减弱,官能团结构发生变化。AHP 处理降解了藕渣 IDF 的非结晶区域,因而其相对结晶度提高,藕渣 IDF 经 AHP 处理后热解峰值温度虽然降低,但质量残留率提高。此外,藕渣 IDF 内部亲水和亲油基团在 AHP 处理后暴露,使其持水力、持油力、胆固醇吸附能力、 Cu^{2+} 吸附能力和阳离子交换能力均显著提高。本研究结果可为藕渣 IDF 的功能性质改善及其在食品加工中的应用提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] 黄思,张永芳,史智英,等. 洪湖莲藕产业无人机施肥技术现状及发展前景[J]. 中国蔬菜, 2022(4): 9-12.

HUANG S, ZHANG Y F, SHI Z Y, et al. Present



注:同一指标不同小写字母表示显著差异($P<0.05$)。

图 5 藕渣 IDF 的阳离子交换能力

Fig.5 Cation exchange power of insoluble dietary fiber from lotus root residue

- situation and development prospect of drone fertilization technology in Honghu lotus root industry[J]. *China Vegetables*, 2022(4): 9–12.
- [2] JI L, GAO W, WEI J, et al. *In vivo* antioxidant properties of lotus root and cucumber: A pilot comparative study in aged subjects[J]. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 2015, 19: 765–770.
- [3] YI Y, HUANG X Y, ZHONG Z T, et al. Structural and biological properties of polysaccharides from lotus root[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 130: 454–461.
- [4] 刘军波, 张慙, 任志灿. 以全藕粉为原料加工藕汁的稳定性及风味[J]. *食品与生物技术学报*, 2011, 30(2): 228–233.
- LIU J B, ZHANG M, REN Z C. Stability and flavor on juice made of full lotus root powder[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2011, 30(2): 228–233.
- [5] 杨波若, 陈韬, 吴强. 藕渣不溶性膳食纤维和菊粉混合添加对广式香肠品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(4): 98–107.
- YANG B R, CHEN T, WU Q. Effect of mixed addition of lotus root residue insoluble dietary fiber and inulin on the quality of cantonese sausage[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(4): 98–107.
- [6] LI S Y, LI J S, ZHU Z Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: Preparation, interaction and identification[J]. *Food Chemistry*, 2020, 314: 126219.
- [7] JIANG G H, BAI X S, WU Z G, et al. Modification of ginseng insoluble dietary fiber through alkaline hydrogen peroxide treatment and its impact on structure, physicochemical and functional properties[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, 150: 111956.
- [8] MA Q Y, MA Z Y, WANG W X, et al. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient–dietary fiber extracted from potato residue[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2022, 153: 112511.
- [9] REN F Y, FENG Y L, ZHANG H J, et al. Effects of modification methods on microstructural and physicochemical characteristics of defatted rice bran dietary fiber[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, 151: 112161.
- [10] 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.
- [11] ZHENG Y J, XU B F, SHI P Q, et al. The influences of acetylation, hydroxypropylation, enzymatic hydrolysis and crosslinking on improved adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130883.
- [12] YOSHIDA B Y, PRUDENCIO S H. Alkaline hydrogen peroxide improves physical, chemical, and techno-functional properties of okara[J]. *Food Chemistry*, 2020, 323: 126776.
- [13] MENG X M, 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 Chemistry: X*, 2019, 3: 100029.
- [14] LIU M, ZHOU S H, LI Y X, et al. Structure, physicochemical properties and effects on nutrients digestion of modified soluble dietary fiber extracted from sweet potato residue[J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110761.
- [15] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124983.
- [16] 陈致印, 刘伟鹏, 王盈希, 等. 三种不同改性方法对甘薯渣不溶性膳食纤维改性效果的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(2): 57–62, 69.
- CHEN Z Y, LIU W P, WANG Y X, et al. Study of three different modification methods on insoluble dietary fiber in sweet potato residue[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 57–62, 69.
- [17] 万仁口, 李功景, 贺杨正, 等. 竹笋膳食纤维的结构特性及其功能性质[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(5): 75–82.
- WANG R K, LI G J, HE Y Z, et al. Structural and functional properties of dietary fiber from bamboo shoots[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(5): 75–82.

- [18] 刘恩超, 黄晓芸, 孙杰, 等. 莲藕多糖的单糖组成分析方法优化[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 292–296.
- LIU E C, HUANG X Y, SUN J, et al. Optimization of monosaccharide composition analysis methods of lotus root polysaccharides [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 292–296.
- [19] 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.
- [20] 曹一凡, 朱利清, 金贞福. 木质素磺酸盐碱性过氧化氢降解及结构表征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(2): 109–114.
- CAO Y F, ZHU L Q, JIN Z F. Alkaline hydrogen peroxide degradation and structural characterization of lignosulfonates[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(2): 109–114.
- [21] LIU S, JIA M Y, CHEN J J, et al. Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 284–292.
- [22] WANG L, SHEN C, LI C, et al. Physicochemical, functional, and antioxidant properties of dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt fruit modified by physical, chemical, and biological enzyme treatments[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(11): 14858.
- [23] MA M M, MU T H. Modification of deoiled cumin dietary fiber with laccase and cellulase under high hydrostatic pressure[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 87–94.
- [24] REHMAN N, MIRANDA M I G, ROSA S M L, et al. Cellulose and nanocellulose from maize straw: An insight on the crystal properties[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2014, 22: 252–259.
- [25] ZHANG Y, LIAO J S, QI J R. Functional and structural properties of dietary fiber from citrus peel affected by the alkali combined with high-speed homogenization treatment [J]. LWT –Food Science and Technology, 2020, 128: 109397.
- [26] ZHANG Y, QI J R, ZENG W Q, et al. Properties of dietary fiber from citrus obtained through alkaline hydrogen peroxide treatment and homogenization treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125873.
- [27] ALFREDO V O, GABRIEL R R, LUIS C G, et al. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (*Salvia hispanica* L.)[J]. LWT–Food Science and Technology, 2009, 42(1): 168–173.
- [28] ZHANG W M, ZENG G L, PAN Y G, 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.
- [29] RAMACHANDRAIAH K, CHIN K B. Antioxidant, antimicrobial, and curing potentials of micronized celery powders added to pork sausages[J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(1): 110–121.
- [30] 陈琬盈, 李江, 郑育桃, 等. 三种膳食纤维的抗氧化活性及主要吸附能力的比较研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(1): 99–104.
- CHEN W Y, LI J, ZHENG Y T, et al. Comparative study on antioxidant activity of three kinds of dietary fibers and the main adsorption capacities[J]. China Brewing, 2015, 34(1): 99–104.
- [31] LUO X L, WANG Q, ZHENG B D, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 109: 1003–1009.
- [32] PRABHA R T, UDAYASHANKARA T H. Adsorption of copper metal ions from aqueous solution using rice husk and groundnut shell[J]. International Journal of Science and Research, 2012, 3(8): 705–709.
- [33] CHAU C F, HUANG Y L. Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibers prepared from the peel of *Citrus sinensis* L. Cv. Liucheng[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(9): 2615–2618.

Effect of Alkaline Hydrogen Peroxide Treatment on Structure and Functional Properties of Insoluble Dietary Fiber from Lotus Root Residue

Zhang Qian, Wang Peiyao, Wang Zicheng, Huang Linxi, He Ling, Xu Lei*

(School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, Jiangsu)

Abstract This study investigated the changes of structure and functional properties of insoluble dietary fiber (IDF) from lotus root residue before and after alkaline hydrogen peroxide (AHP) treatment. Results showed that *D*-glucose content of lotus root residue IDF increased significantly by 9.52% ($P < 0.05$), while the contents of other monosaccharides decreased significantly ($P < 0.05$) by AHP treatment. Scanning electron microscopy analysis showed that IDF had fluffy structure and wrinkled surface after AHP treatment. The results of X-ray diffraction indicated the crystal structure of IDF did not change after AHP treatment, but the diffraction intensity increased from 13.09% to 16.13% ($P < 0.05$). Infrared spectroscopy indicated the breakage of some chemical bonds of IDF after AHP treatment, and the characteristic adsorption peaks weakened or disappeared. Thermogravimetric analysis showed that after AHP treatment, the peak pyrolysis temperature of IDF decreased, but the mass residue rate increased from 10.43% to 15.94% ($P < 0.05$). Moreover, the water holding capacity, oil holding capacity, cholesterol adsorption capacity, Cu^{2+} adsorption capacity and cation exchange power of IDF were effectively enhanced ($P < 0.05$) after AHP treatment, sodium nitrite adsorption capacity of did not change significantly ($P > 0.05$), while the expansion capacity was greatly reduced ($P < 0.05$). These results suggested that AHP treatment can change the structure of lotus root residue IDF and improve its functional properties.

Keywords alkaline hydrogen peroxide; lotus root residue; insoluble dietary fiber; structure; functional properties