

玉米皮汽爆-水热提取阿魏酰阿拉伯低聚木糖工艺研究

肖卫华 刘 丽 赵宗格 丁凯丽 张 慧 何颖慧 张 楠
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要:为实现玉米皮的高值化利用,本研究采用蒸汽爆破辅助微波水热工艺提取阿魏酰阿拉伯低聚木糖(F-AXOs),以糖浓度、糖得率、聚合度为评价指标筛选工艺参数,并探究产物的抗氧化与益生元活性。结果表明,低压短时汽爆预处理可显著促进 F-AXOs 生成,提高低聚糖得率,在 1.5 MPa、2 min 的汽爆条件结合水热处理下,F-AXOs 浓度高达 11.56 mmol/L,低聚糖总得率达 76.11%。机理分析显示,汽爆预处理有效破坏了细胞壁中半纤维素结构,促使无定形区组分降解,从而强化低聚糖溶出。功能评价表明,汽爆-水热产物对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)及 2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)阳离子(ABTS⁺)自由基的清除能力显著优于低聚木糖(XOS)对照,表现出较强的抗氧化活性;体外发酵过程中短链脂肪酸(SCFAs)生成速率较快,证实该提取物具有良好的益生元特性。综上,汽爆-水热工艺在无需额外添加化学试剂的条件下有效提升了 F-AXOs 浓度,所得产物表现出良好的抗氧化与益生元活性,为其在食品领域的潜在应用提供了理论依据。

关键词:玉米皮;汽爆-水热预处理;阿魏酰阿拉伯低聚木糖;抗氧化活性;益生元活性

中图分类号: S216.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0121-11 OSID: 

Steam Explosion – Hydrothermal Extraction Process of Feruloylated Arabinoxylan Oligosaccharides from Corn Husk

Xiao Weihua Liu Li Zhao Zongge Ding Kaili Zhang Hui He Yinghui Zhang Nan
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to achieve high-value utilization of corn husk, a steam explosion-assisted microwave hydrothermal process was employed to extract feruloylated arabinoxylan oligosaccharides (F-AXOs). Process parameters were screened by using sugar concentration, sugar yield, and degree of polymerization as evaluation criteria, and the antioxidant and prebiotic activities of the products were investigated. The results indicated that short-duration, low-pressure steam explosion pretreatment significantly promoted F-AXOs formation and increased oligosaccharide yield. Under steam explosion conditions of 1.5 MPa for 2 min combined with hydrothermal treatment, the F-AXOs concentration peaked at 11.56 mmol/L, and the total oligosaccharide yield reached 76.11%. Mechanistic analysis revealed that steam explosion pretreatment effectively disrupted the hemicellulose structure in the cell wall, promoting the degradation of the amorphous region, thereby enhancing oligosaccharide elution. Functional evaluation indicated that the steam explosion – hydrothermal products exhibited antioxidant activity against 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) cation (ABTS⁺) radicals, demonstrating strong antioxidant activity. The rapid rate of short-chain fatty acids (SCFAs) production during in vitro fermentation confirmed that this extract possessed excellent prebiotic properties. In summary, the steam explosion – hydrothermal process effectively increased the concentration of F-AXOs without the need for additional chemical reagents. The obtained products exhibited good antioxidant and prebiotic activity, providing a theoretical basis for their potential applications in the food industry.

Key words: corn husk; steam explosion – hydrothermal pretreatment; feruloylated arabinoxylan oligosaccharides; antioxidant activity; prebiotic activity

0 引言

我国年产玉米皮达 3 000 万吨,但因精深加工技术缺失,当前综合利用率不足 10%,主要作为饲料或发酵原料,部分甚至废弃,造成了资源的浪费^[1]。玉米皮是包裹在玉米籽粒外部的表皮部分,是淀粉生产过程中的重要副产品^[2],富含膳食纤维(核心组分为半纤维素)、蛋白质、淀粉、酚类化合物以及其他物质。玉米皮半纤维素中富含木糖、阿拉伯糖,且玉米皮中酚类物质主要组成为阿魏酸(Ferulic acid, FA)及其聚合物^[3],是制备阿魏酰阿拉伯低聚木糖(Feruloylated arabinoxylan oligosaccharides, F-AXOs)的理想原料。然而,玉米皮中木质纤维素通过复杂交联形成稳定致密结构,导致传统酶解法提取率低、成本高,碱法则易破坏酯键解离 FA 降低功能性,生物发酵法时间长、产物复杂纯化困难。现需开发有效的处理手段突破上述技术的局限性,在高效解构细胞壁的同时实现 F-AXOs 的高得率提取与功能完整性保留。

近年来,蒸汽爆破技术(简称汽爆)在生物质转化领域发展迅速,凭借其作用时间短、处理效率高、能耗相对较低、过程无污染以及易于工业化放大等显著优势,已成为木质纤维素资源转化领域最具发展前景的预处理技术之一^[4]。汽爆预处理的核心机制在于其能剧烈破坏原料细胞壁,促使其由刚性有序结构转变为疏松解聚的多孔状态,从而显著增加比表面积并极大提高物料对后续预处理或转化步骤的可及性^[5]。微波水热技术提取半纤维素低聚糖的核心机制在于热效应与非热效应的协同作用,一方面,微波瞬时热效应可显著降低溶液黏度、破坏物料细胞壁结构,促使活性物质释放;另一方面,高频电磁场作用下极性分子高频旋转可大幅增加细胞内部分子动能,通过增强分子间相互作用破坏纤维素晶体结构、降低结晶度,从而大幅提升半纤维素水解效率^[6]。目前,针对汽爆提取低聚木糖(Xylooligosaccharides, XOS)的研究主要集中在工艺参数优化及其与化学(酸/碱)或生物(微生物/酶)预处理方法的联合应用^[7]。相比之下,汽爆预处理与微波水热处理的协同效应研究则相对较少。

基于此,本文旨在探究汽爆-水热处理对玉米皮转化效率的影响。具体研究目标:对玉米皮进行不同条件的汽爆预处理,而后进行统一的微波水热处理,系统分析不同预处理条件对液体产物(糖浓度、糖得率和聚合度)和固体产物(结晶结构、化学键)的影响规律,并通过功能评价分析不同预处理 F-AXOs 水解液对 DPPH、ABTS⁺ 自由基的清除能力及

SCFAs 产量的影响,为玉米皮高值转化提供思路。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

1.1.1 实验原料

玉米皮(CH)采集自山东省德州市。将收获后的玉米皮在 60℃ 的烘箱中干燥 48 h,然后原料经初步粉碎呈碎片状,其组成包括葡聚糖(28.55%)、半纤维素(29.07%)和木质素(10.04%)等。最后,将玉米皮进行脱淀粉、蛋白处理,选用热稳定性 α 淀粉酶脱除淀粉,中性蛋白酶脱除蛋白,具体步骤如下:样品与水以液料比 10 mL/g 混合后加入占玉米皮质量 1% 的淀粉酶,90℃ 水浴 120 min,待水浴温度冷却至 50℃ 后再加入占玉米皮质量 2.4% 的中性蛋白酶,持续搅拌 2 h 后在 100℃ 条件下水浴 10 min 灭酶。完成上述步骤后,在 300 目尼龙布袋中用 60~70℃ 的热水对固体残渣反复洗涤至洗出液无葡萄糖和蛋白质检出。葡萄糖和蛋白质检测方法依次采用 DNS 显色法和考马斯亮蓝 G-250 法^[8]。后续实验所用原料均为脱除淀粉/蛋白的玉米皮(标记为 CM)。

1.1.2 仪器与设备

QBS-80 型汽爆微型机,清正生态科技有限公司;Synth WAVE 型微波反应系统, Milestone 公司,意大利;Spectrum 400 型傅里叶变换红外光谱仪, PerkinElmer 公司,美国;XD3 型 X 射线衍射仪,北京普析通用仪器有限责任公司;Hitachi L-7000 型高效液相色谱仪,日立公司,日本;GC-2014 型气相色谱仪,岛津公司,日本。

1.2 实验方法

1.2.1 汽爆预处理玉米皮

将 40 g 左右玉米皮调整至含水率为 20%,搅拌均匀,于 4℃ 条件下平衡 12 h。将平衡后玉米皮加入汽爆设备的密闭工作罐体,通入高温高压水蒸气,使容器内压力迅速升至汽爆压力,开始计时并保持压力,倒计时结束瞬间气泵启动,打开罐体释放压力。设定汽爆压力为 1.5、1.8 MPa,保压时间为 2、5、10 min。每个处理组重复汽爆 3 次。汽爆结束后收集全部产物,使用抽滤装置对产物进行固液分离,准确测量并记录液体部分的体积(mL),固体部分的质量(g)和含水率(%)。固液分离后的液体部分标记为 L,固体部分干燥后进行储存。

1.2.2 汽爆-水热预处理玉米皮

汽爆固体部分玉米皮按液料比 10 mL/g 混合均匀后加入微波反应系统,设定升温时间为 3 min,目标温度 140℃,保温时间 60 min。每个水热处理组

重复 3 次。待微波反应系统冷却至室温(20℃)后,将提取浆料转移至离心管,离心机设置转速为 8 000 r/min,离心时间为 10 min,取上清液过 0.22 μm 水系滤膜得到水热提取液。汽爆玉米皮固体水热提取液命名为 S。

1.2.3 阿魏酰阿拉伯低聚木糖浓度的测定

游离 FA 浓度测定。提取液稀释 6 倍后,用配有紫外检测器的高效液相色谱仪(High performance liquid chromatography, HPLC)测定其中游离 FA 的浓度。HPLC 测试条件如下:检测器波长为 320 nm,色谱柱为 XBridge BEH C18 柱(5 μm, 4.6 × 250 mm, Waters, 爱尔兰),样品分离采用梯度洗脱进行,流动相 A 为体积分数 0.05% 的甲酸水溶液,流动相 B 为体积分数 0.05% 的甲酸乙腈溶液,流速 0.5 mL/min,进样体积 20 μL,洗脱时间 55 min。其中洗脱条件如下:洗脱时间为 0 ~ 34 min,流动相 A 比例 99%,流动相 B 比例 1%;洗脱时间为 35 ~ 41 min,流动相 A 比例 50%,流动相 B 比例 50%;洗脱时间为 42 min,流动相 A 比例 25%,流动相 B 比例 75%;洗脱时间为 43 ~ 55 min,流动相 A 比例 99%,流动相 B 比例 1%。

总 FA 浓度测定。取 3 mL 稀释后的提取液与同体积 1 mol/L 氢氧化钠溶液混匀,并于 100℃ 条件下水浴 90 min。冷却后用 1 mol/L HCl 调 pH 值为 5 ~ 8,并过 0.22 μm 水系滤膜,滤液用 HPLC 测定总 FA 的浓度,HPLC 测试条件与游离 FA 浓度测定一致。

F-AXOs 浓度测定参照文献[9]改进,总 FA 浓度与游离 FA 浓度差值为 F-AXOs 浓度。

1.2.4 低聚糖浓度的测定

单糖浓度测定。提取液稀释 8 倍后,用配有示差检测器的 HPLC 测定其中单糖的浓度,包括葡萄糖、木糖和阿拉伯糖。HPLC 测试条件如下:色谱柱为 Aminex HPX-87 H(300 × 7.8 mm, Bio-Rad, 美国),柱温 55℃,流动相为 0.005 mol/L H₂SO₄,流速 0.6 mL/min,洗脱时间 30 min。

总糖浓度测定。提取液中总糖浓度采用酸水解法测定,具体方法如下:将提取液稀释 8 倍,摇匀后取 3 mL 置于玻璃样品瓶中,加入 105 μL 质量分数 72% 的硫酸,在 121℃ 下酸解 60 min。用碳酸钙将酸解后样品 pH 值调至 5 ~ 6 后静置 30 min,随后过 0.22 μm 水系滤膜,滤液用 HPLC 测定葡萄糖、木糖和阿拉伯糖浓度,此浓度为总糖浓度。

低聚糖浓度测定。总糖浓度与单糖浓度的差值为低聚糖浓度。

1.2.5 低聚糖聚合度

低聚糖聚合度参照文献[10]测定,用总糖浓度

与还原糖浓度的比值表示。其中,提取液的还原糖浓度采用 3,5-二硝基水杨酸法(DNS 法)测定。配制木糖标准曲线(0.125、0.25、0.5、1 g/L),分别取不同浓度的标样 1 mL,加入 3 mL DNS 试剂,沸水浴 5 min,冷却至室温后,使用紫外分光光度计在 540 nm 处测定样品吸光度,绘制标准曲线。取 1 mL 稀释后提取液加入 3 mL DNS 试剂,沸水浴 5 min,冷却至室温后测定吸光度,根据标准曲线方程计算提取液中还原糖浓度。

1.2.6 低聚糖得率

汽爆干物质回收率 R_d 、汽爆液体部分低聚糖得率 R_l 、汽爆固体部分低聚糖得率 R_s 、汽爆-水热低聚糖总得率 R_h 计算公式为

$$R_d = \frac{m_s + m_l}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$R_l = \frac{0.88m_{ol}}{R_d m_0 w_h} \times 100\% \tag{2}$$

$$R_s = \frac{0.88m_{os}}{R_d m_0 w_h} \times 100\% \tag{3}$$

$$R_h = R_l + R_s \tag{4}$$

式中 m_s ——滤饼干物质质量, g
 m_l ——滤液干物质质量, g
 m_0 ——汽爆原料质量, g
 m_{ol} ——滤液低聚糖质量, g
 w_h ——玉米皮半纤维素质量分数, %
 m_{os} ——滤饼干物质水热产物低聚糖质量, g

1.3 表征方法

1.3.1 木质纤维组成

不同预处理样品中纤维素、半纤维素和木质素的含量测定方法参照 NREL-TP-510-42618,每个样品重复 2 次^[11]。高效液相色谱仪测定过程中的色谱柱为 Aminex HPX-87P,柱温为 80℃,流动相为超纯水,流速为 0.6 mL/min,配备的检测器为示差检测器。

1.3.2 X 射线衍射(XRD)测定

使用 X 射线衍射仪对玉米皮样品进行晶体结构分析,测试条件为 Cu 靶,采样步宽为 0.02°, 2θ 在 5° ~ 40° 内以 2(°)/min 的扫描速度进行分析。每个样品重复测量 3 次,取平均值作为样品纤维素结晶度测定值,结晶度 C_r 计算公式为

$$C_r = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100\% \tag{5}$$

式中 I_{002} ——2θ = 22° 附近 002 衍射峰最大强度
 I_{am} ——2θ = 18° 附近衍射峰强度

1.3.3 傅里叶红外光谱(FTIR)测定

在配备通用 ATR 取样附件的 PerkinElmer

Spectrum 400 系列 FT-IR 分光光度计上进行光谱的测定,以分析不同预处理样品官能团的变化。扫描波数范围为 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 32 次,分辨率为 4 cm^{-1} 。每个样品重复测量 3 次,以平均光谱作为该样品的红外光谱结果。

1.4 工艺评价

1.4.1 DPPH 自由基清除实验

DPPH 自由基清除能力测定参照文献[12]改进,使用无水乙醇配制 DPPH 工作液(0.1 mmol/L),取 2 mL 样品溶液与等体积 DPPH 溶液混合,避光反应 30 min 后于 517 nm 波长处测定吸光度,空白对照采用 2 mL 无水乙醇代替 DPPH 溶液重复上述操作,每个样品重复测定 3 次吸光度,DPPH 自由基清除率 S_D 计算公式为

$$S_D = \frac{A_0 - A + A_w}{A_0} \times 100\% \tag{6}$$

式中 A_0 ——DPPH 工作液吸光度
 A ——反应液吸光度
 A_w ——空白对照吸光度

1.4.2 ABTS⁺ 自由基清除实验

ABTS⁺ 自由基清除能力测定参照文献[13]改进,将 7 mmol/L ABTS⁺ 水溶液和 2.45 mmol/L $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 水溶液等体积混合,于室温避光反应 $12 \sim 16\text{ h}$ 后得到母液。使用前,用无水乙醇将母液稀释至吸光度 0.7 ± 0.02 形成 ABTS⁺ 工作液,现用现配。分别准确吸取 0.2 mL 不同浓度的待测液和 0.8 mL ABTS⁺ 工作液,混匀后于室温避光反应 30 min ,用紫外分光光度计测定其在 734 nm 下的吸光度 A ;用 0.2 mL 蒸馏水代替待测液,重复上述操作,测定吸光度 A_0 ;采用维生素 C 为阳性对照,每个样品重复测定 3 次吸光度,ABTS⁺ 自由基清除率 S_A 计算公式为

$$S_A = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \tag{7}$$

1.4.3 体外发酵实验

采用体外模拟发酵实验测定提取液的益生元特性,每个样品重复测定 3 次。

(1) 配制体外模拟发酵培养基:依次准确称取 2 g 蛋白胨、 0.5 g 半胱氨酸盐、 0.5 g 胆盐、 0.05 g 氯化血红素、 2 g 酵母膏、 0.04 g K_2HPO_4 、 0.01 g CaCl_2 、 0.04 g KH_2PO_4 、 0.01 g MgSO_4 、 2 g NaHCO_3 、 0.1 g NaCl 和 2 mL Tween 80 于烧杯中,加入 200 mL 蒸馏水溶解,搅拌均匀,转移至锥形瓶中。然后取 5 mL 提取液和 4 mL 培养基于厌氧发酵瓶中,氮吹 2 min 后进行密封操作,于高压蒸汽灭菌锅 121°C 下灭菌 20 min 。

(2) 粪便浆制备:新鲜粪便样本来自健康成年人,在实验前至少 3 个月未服用抗生素,且没有肠道疾病史。通过将粪便样品(5.0 g)与无菌生理盐水(45 mL 、 0.9%)混合来配制粪便匀浆,用于后续实验。

(3) 体外模拟发酵:用移液枪吸取 1 mL 粪便浆接种至培养基,将厌氧发酵瓶置于恒温培养箱(37°C)中孵育。分别在发酵 8 h 和 16 h 提取适量的发酵液,测定样品产生短链脂肪酸(SCFAs)的浓度。

(4) 成分分析:取 1 mL 发酵液过滤后($0.22\text{ }\mu\text{m}$ 有机系滤膜)用 $100\text{ }\mu\text{L}$ 3% 甲酸酸化,使 pH 值小于 4.0 。使用气相色谱仪定量分析 SCFAs(主要是丙酸和丁酸)的浓度。采用氢火焰离子化检测器(FID)和 DB-WAX 型分析柱($30\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)进行测定分析。气相色谱的检测方法参考文献[14]并稍作修改。升温程序如下:色谱柱初始温度设定为 60°C ,持续时间为 2 min ;随后以 20°C/min 的速率将温度从 60°C 提高到 140°C ,然后以 8°C/min 的速率从 140°C 升到 150°C ,在 150°C 下保持稳定 1.5 min ;再以 120°C/min 的速率从 150°C 迅速上升到 200°C , 200°C 保持 1.25 min ;之后,以 120°C/min 的速率从 200°C 升高到 240°C ;最后,在 240°C 下保持 3 min 。以 N_2 为载气,流速为 1.6 mL/min 。FID 温度调至 280°C ,分流比设为 $35:1$ 。

1.4.4 工艺质量衡算

以 1 t 玉米皮为原料,基于前期筛选得到的预处理条件,汽爆-水热提取 F-AXOs 工艺选取汽爆条件为 1.5 MPa 、 2 min ,水热条件为 140°C 、 1 h ,对工艺流程中的各环节展开系统的质量衡算,核算低聚糖的产出效率。

1.5 数据分析

实验数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,Duncan 单因素方差用于检验均值。方差和相关性分析用 SPSS 26.0 软件进行,制图使用 Origin 2026 软件完成。

2 结果与分析

2.1 汽爆预处理玉米皮液体产物分析

不同汽爆预处理玉米皮的液体产物如图 1(图中不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$),下同)所示。图 1a、1b 对比分析了不同汽爆压力与保压时间对玉米皮汽爆液体产物中 FA 和 F-AXOs 的影响。如图 1a 所示,保压时间为 2 min 时, 1.8 MPa 的 FA 浓度显著高于 1.5 MPa ($p < 0.05$),表明高压更利于 FA 释放。原因可能是在高压汽爆的过程中,高温高压水蒸气渗透玉米皮内部,引发其木质纤维结构的机械性解离,主要降解其半纤维素组

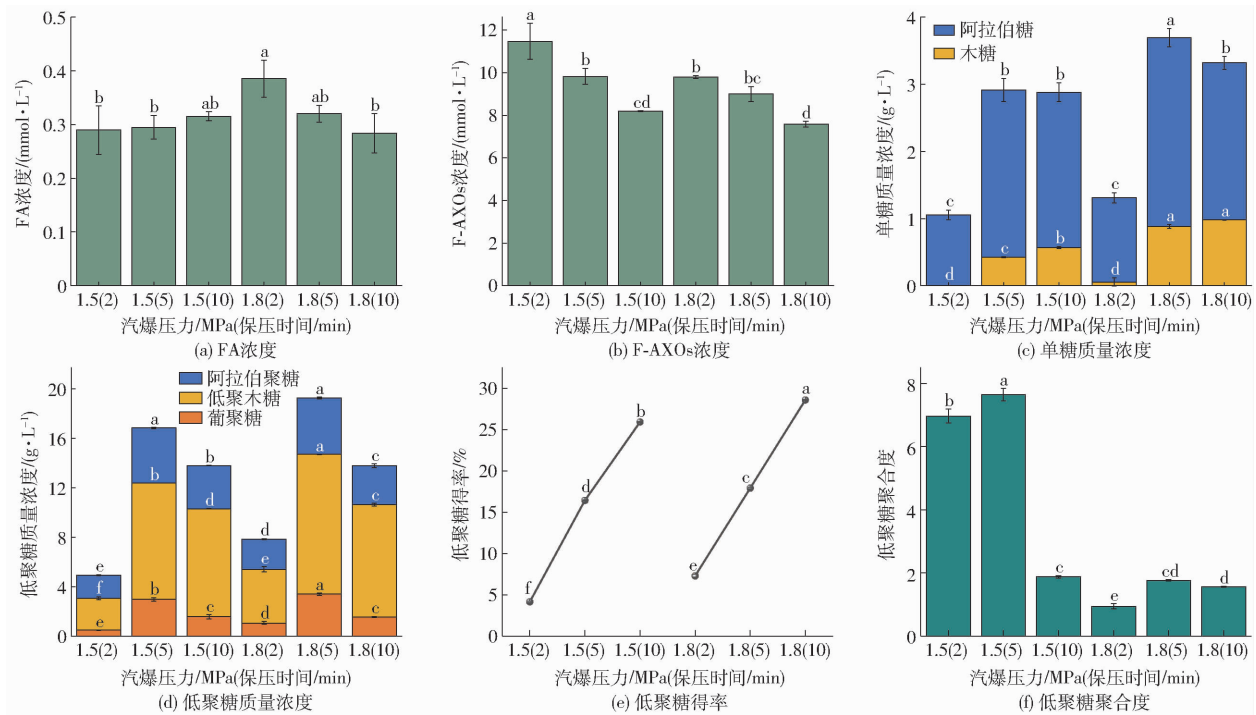


图 1 汽爆液体产物的浓度、得率、聚合度

Fig. 1 Concentration, yield and degree of polymerization of steam explosion liquid products

分^[15],同时木质素会发生软化并伴随部分降解反应,释放出小分子酚类化合物,加剧了半纤维素中结合态 FA 的释放。汽爆压力为 1.5 MPa 时,延长保压时间并未显著提升 FA 浓度($p > 0.05$);而汽爆压力为 1.8 MPa 时,FA 浓度在保压时间为 2 min 时达到峰值,随着保压时间延长而下降,这归因于 FA 的热不稳定性导致其在长时间高温下发生降解^[16],因此高压短时处理最有利于 FA 释放。

如图 1b 所示,1.5 MPa 保压 2 min 时,F-AXOs 浓度达到最大值(11.48 mmol/L),这表明此条件下与半纤维素共价结合的阿魏酸部分得以保留;相同保压时间下,1.8 MPa 压力对应的 F-AXOs 浓度普遍低于 1.5 MPa,且延长保压时间亦未显著提升其浓度($p > 0.05$)。上述结果表明高压与长时间处理不利于 F-AXOs 的释放或生成。FTIR 分析为此提供了机制解释:高压条件下 1 736 cm⁻¹ 处酯键特征峰强度降低,提示高压汽爆引发了阿魏酸酯键断裂,进而导致 F-AXOs 减少。而相同保压时间下,图 1a 游离的 FA 浓度呈上升趋势也印证了这一点,阿魏酸酯键断裂导致结合态的 FA 转变为游离态。

如图 1c、1d 所示,随着汽爆压力增加和保压时间延长,汽爆液体产物中的单糖含量逐渐增加,表明剧烈的汽爆条件促使更多低聚糖过度水解为单糖。在高压短时条件下,低聚糖浓度显著提升($p < 0.05$),这源于高压蒸汽作用下半纤维素化学键断裂,经水解反应生成低聚糖;然而,长时间高压处理对低聚糖释放的提升效果并不显著($p > 0.05$)。同

一汽爆压力处理组间,延长保压时间初期能显著提高液体产物中低聚糖浓度($p < 0.05$),这可能是由于保压时间影响介质的渗透度和半纤维素的降解,短时汽爆介质未充分进入细胞,玉米皮降解不充分,溶出的低聚糖较少。但持续延长则导致其浓度下降,这与贺永惠等^[17]用蒸汽爆破处理小麦麸皮的研究结果相同,这可能是因为过长时间的蒸汽爆破导致半纤维素侧链上的乙酰基大量脱落,反应体系的酸度升高,玉米皮内部的氢键结构被破坏,进而引发低聚糖和单糖的过度降解并生成糠醛(主要由木糖和阿拉伯糖等戊糖产生)等副产物^[18]。结果表明,汽爆条件为 1.8 MPa、5 min 时,液体产物中低聚糖浓度达到最大值,质量浓度为 15.86 g/L。

如图 1e 所示,汽爆压力为 1.5 MPa 时,低聚糖得率从 4.15% 提高到 25.92%,汽爆压力为 1.8 MPa 时,低聚糖得率从 7.29% 提高到 28.60%,说明同一汽爆压力处理组间,随着保压时间的延长,低聚糖得率呈上升趋势。这主要是在汽爆过程中,将半纤维素水解为木糖和阿拉伯糖单体并释放出乙酸,原位生成的乙酸催化半纤维素中糖苷键的断裂^[19],半纤维素自水解程度加剧,使得更多低聚糖进入液相,导致汽爆液体产物中低聚糖得率呈上升趋势。如图 1f 所示,高压汽爆条件下,低聚糖的聚合度显著降低($p < 0.05$),这主要源于高严重因子下,低聚糖的过度水解^[20]使得低聚糖进一步水解为木糖和阿拉伯糖,不利于获得目标产物,这与图 1c 中高压汽爆条件下单糖浓度的上升相对应。上述结果表

明,增加汽爆严重因子(提高汽爆压力或延长保压时间)可有效促进半纤维素自水解,并对低聚糖最终得率产生显著提升作用($p < 0.05$)。但汽爆产物的不同组分无法在相同条件下同时实现最佳生产,需要在保压时间和汽爆压力之间合理调控,因此最佳的蒸汽爆破预处理需平衡生物质原料的可及性和降解程度,以最大限度地提高目标产物的转化率^[21]。

2.2 汽爆预处理玉米皮固体产物微观结构的变化

2.2.1 XRD 分析

不同汽爆预处理玉米皮的 XRD 图谱如图 2 所示。通过计算结晶度指数 C_r ,揭示汽爆预处理后玉米皮晶体结构的变化。由图 2 可知,未经预处理的对照组(CM)玉米皮结晶度为 21.24%,而汽爆预处理的样品结晶度均显著提升。这表明汽爆处理有效降解了玉米皮中的无定形组分(如半纤维素和部分非结晶纤维素),导致结晶区比例相对增加^[22]。在相同保压时间下,1.8 MPa 处理组的结晶度普遍高于 1.5 MPa,表明较高的汽爆压力能更有效地破坏无定形结构。在相同汽爆压力下,延长保压时间亦能进一步提高结晶度。具体而言,汽爆压力为 1.5 MPa 时,保压时间由 2 min 延长至 10 min,结晶度从 30.32% 升至 35.19%;汽爆压力为 1.8 MPa 时,保压时间的延长使结晶度从 33.63% 升至 35.00%。结晶度随着保压时间延长而升高的现象,印证了汽爆预处理可更彻底地降解半纤维素等无定形组分。结晶态纤维素高度有序,分子间通过氢键紧密连接,赋予玉米皮机械稳定性^[23],不利于微波水热作用的发挥,导致玉米皮降解效率较低。汽爆预处理通过选择性去除无定形组分、提高结晶度,有效破坏了玉米皮的致密结构,因此,汽爆是一种高效的玉米皮预处理方法。

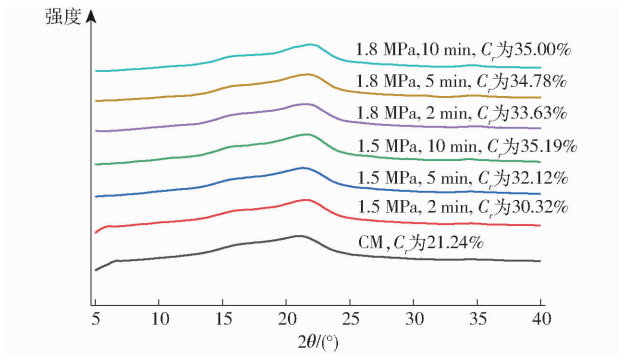


图 2 不同汽爆预处理玉米皮的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of different steam explosion pretreated corn husk

2.2.2 FTIR 分析

不同汽爆预处理玉米皮的 FTIR 光谱如图 3 所

示。由图 3 可知,各波数位置的特征吸收峰对应不同官能团的振动模式:1 241 cm^{-1} 和 1 736 cm^{-1} 处的吸收峰与半纤维素组分相关,其中 1 241 cm^{-1} 处峰归属于半纤维素糖醛酸酯中 C—O 键的伸缩振动,1 736 cm^{-1} 处峰则对应木质素-半纤维素复合结构中木聚糖乙酰基($\text{CH}_3\text{C}=\text{O}$)的 C=O 键伸缩振动,亦与木质素中对香豆酸盐及阿魏酸结构有关^[24];1 164 cm^{-1} 处峰来源于阿拉伯糖和木糖中 C—O—C 糖苷键的伸缩振动,而 1 033 cm^{-1} 处峰对应木糖特有的 C—O—C 糖苷键振动吸收。

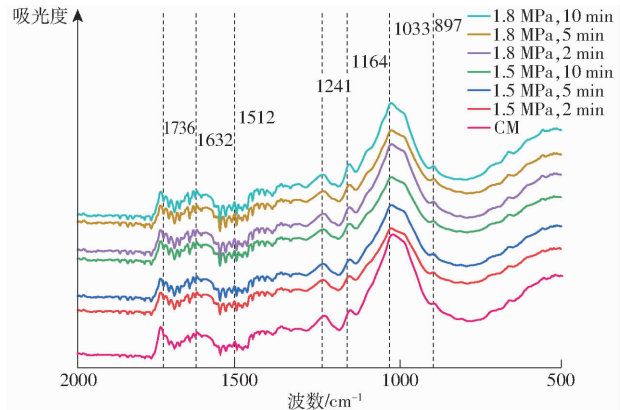


图 3 不同汽爆预处理玉米皮的 FTIR 图谱

Fig. 3 ATR-FTIR patterns of different steam explosion pretreated corn husk

汽爆预处理后,玉米皮的红外光谱发生显著变化。如图 3 所示,1 033 cm^{-1} 处特征峰强度减弱,且 1 241 cm^{-1} 和 1 736 cm^{-1} 处特征峰强度随汽爆压力升高和保压时间延长而明显降低。上述变化表明,在较高汽爆强度下,剪切力作用可能会导致半纤维素关键酯键发生断裂,从而加剧脱乙酰基反应^[25],致使半纤维素结构遭到显著破坏。1 033、1 241、1 736 cm^{-1} 等多处半纤维素特征峰的同步减弱,共同证实了汽爆预处理对玉米皮细胞壁中半纤维素组分的有效降解,从而促进糖类物质的溶出。

2.3 汽爆-水热预处理玉米皮产物分析

图 4 对比了不同汽爆压力和保压时间对玉米皮汽爆固体部分进一步微波水热产低聚糖的影响。图 4a 展示了水热处理产物中 FA 的浓度变化。在较为温和的汽爆条件下(低压/短时),FA 仍主要以酯键形式结合于玉米皮半纤维素(如阿拉伯木聚糖)中,细胞壁结构未得到充分破坏,故水热仅释放出少量 FA。提高汽爆压力能显著提升后续水热产物中 FA 的浓度($p < 0.05$),这主要源于更强的汽爆处理产生的物理剪切力破坏了木质素-半纤维素复合物结构,促进了纤维素和半纤维素中糖苷键及半纤维素-木质素键的断裂^[26],使纤维结构趋于松散,从而增强了微波水热过程的可及性与传质速率,有

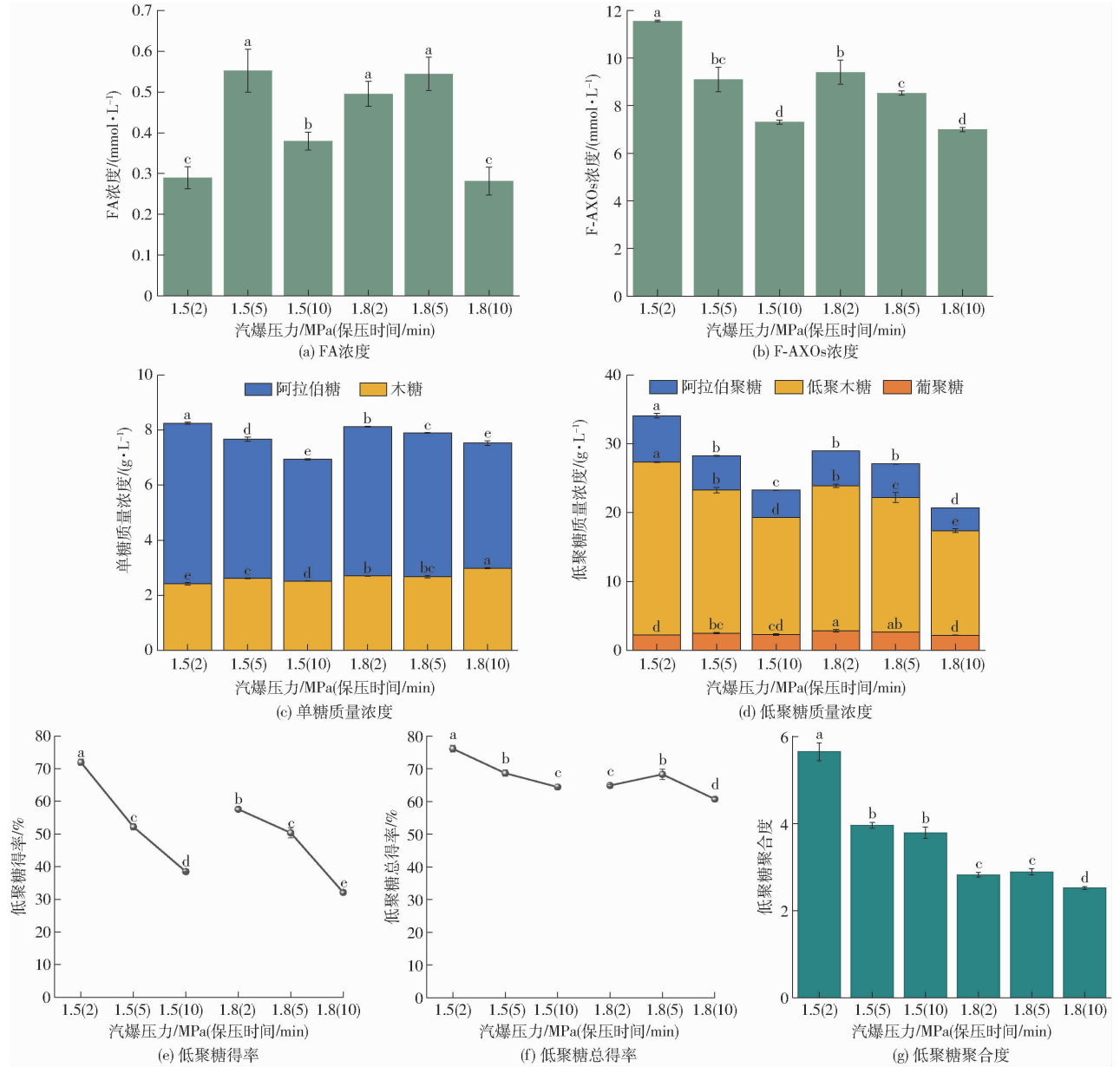


图 4 汽爆-水热预处理玉米皮产物的浓度、得率、聚合度

Fig. 4 Concentration, yield and degree of polymerization of steam explosion liquid products

利于 FA 酯键断裂及游离 FA 释放。然而,持续延长保压时间后,FA 浓度呈下降趋势,这可能是由于释放出的 FA 在高温条件下发生进一步降解^[27](如脱羧或聚合反应)。

如图 4b 所示,在 1.5 MPa 汽爆压力下保压 2 min 后结合水热转化,可获得最高 F-AXOs 浓度,达 11.56 mmol/L。在此较为温和的汽爆条件下,机械-热化学协同作用实现了对半纤维素无定形区域的选择性解离^[28],而阿魏酰基酯键(连接 FA 与木糖残基的关键化学键)得以相对保留。这种选择性破坏使后续水热过程能够有效释放大量 F-AXOs;同时,图 4a 中同条件下 FA 浓度较低,表明仅有少量 FA 从 F-AXOs 中解离,较好地保留了 F-AXOs 的功能性。因此,低压短时汽爆预处理结合水热处理在

半纤维素解聚与阿魏酰基保留之间实现了较优平衡,证实了汽爆预处理在半纤维素定向转化方面的优势。然而,随着汽爆压力增加或保压时间延长,固体残渣经水热产生的低聚糖浓度呈下降趋势,这可能与低聚糖在水热条件下的过度降解有关^[29],亦可能源于汽爆过程已释放大量低聚糖,致使后续水热作用底物减少。综上所述,优化汽爆压力与保压时间对于维持理想预处理效果至关重要,可实现半纤维素大分子的可控解聚与功能基团的特异性保留,是高附加值目标产物(F-AXOs)定向转化的关键。

图 4c、4d 是汽爆-水热预处理玉米皮后液体产物中单糖和低聚糖的浓度。如图 4c 所示,同一汽爆压力处理组间,延长保压时间液体产物中阿拉伯糖的浓度显著降低($p < 0.05$),木糖浓度没有显著变

化。这可能是由于高温高压蒸汽促使玉米皮中阿拉伯木聚糖侧链的阿拉伯呋喃糖苷键^[30]断裂,形成游离阿拉伯糖,在较短时间(2 min)内,阿拉伯糖释放量最大,随着保压时间延长,已释放的阿拉伯糖可能进一步发生降解反应(如脱水生成糠醛),导致其浓度降低。木糖作为木聚糖主链的组成单元,其糖苷键在汽爆条件下水解相对缓慢,且短时间内降解产物的生成与消耗趋于平衡,故木糖浓度未出现显著变化。如图 4d 所示,同一汽爆压力处理组间,随着保压时间延长,阿拉伯聚糖和低聚木糖的浓度显著降低($p < 0.05$),葡聚糖浓度始终保持较低水平且无明显变化。这可能源于过度汽爆导致已生成的阿拉伯聚糖和低聚木糖中糖苷键继续断裂,降解为游离阿拉伯糖和木糖,甚至进一步脱水生成糠醛等副产物^[31],致使阿拉伯聚糖和低聚木糖的浓度显著降低。玉米皮中的葡聚糖主要来源于纤维素,而纤维素的结晶度较高、聚合度大,汽爆对纤维素结晶区破坏有限^[32],因此葡聚糖的溶出量始终处于较低水平,且不受保压时间的显著影响。

图 4e、4f 揭示了汽爆预处理强度与水热处理低聚糖得率之间的关系。如图 4e、4f 所示,随着汽爆压力增加与保压时间延长,固体残渣经水热处理的低聚糖得率呈下降趋势,1.5 MPa 条件下由 71.96% 降至 38.49%,1.8 MPa 条件下由 57.60% 降至 32.13%,且该趋势在 1.5 MPa 低压条件下更为显著。如图 4f 所示,低压短时汽爆预处理显著提升了整个汽爆-水热工艺的低聚糖得率($p < 0.05$),这可能是由于高温蒸汽在短时间内浸润纤维,使其软化、粘结强度降低^[33],在实现高效解聚的同时较好地维持了产物结构完整性,为后续水热反应提供了有利条件。在汽爆预处理工艺最优条件下,低聚糖总得率提升至 76.11%,表明汽爆预处理在释放大量低聚糖的同时,有效破坏了玉米皮细胞壁结构,促使原料体积膨胀及木质纤维素网络瓦解,增加了孔隙率与比表面积^[34],溶剂分子更易渗入玉米皮片层结构,从而显著促进了后续水热过程的解聚效率。由图 4g 可知,汽爆强度的加大亦导致水热产物低聚糖聚合度逐渐降低,表明低聚糖发生进一步水解生成单糖,不利于目标产物 F-AXOs 的富集。

2.4 汽爆-水热预处理玉米皮产物的功能评价

2.4.1 抗氧化活性

图 5 是不同预处理玉米皮水热产物抗氧化活性的评价结果,其中 XOS 代表低聚木糖标准品,140℃ CM 代表仅水热处理组,即粗粉玉米皮 140℃ 水热 1 h 产物,SE-2min/5min-L 代表仅汽爆处理组,即在 1.5 MPa 汽爆压力下保压 2 min/5 min 所得液体

产物,SE-2min/5min-S 代表汽爆-水热处理组,即在 1.5 MPa 汽爆压力下保压 2 min/5 min 所得固体部分经 140℃ 水热 1 h 产物,VC 代表抗坏血酸。由图 5a 可知,各预处理水热产物对 DPPH 自由基的清除率存在差异,且均显著高于同浓度 XOS 对照($p < 0.05$),表明玉米皮预处理水热产物较商品 XOS 具有更优异的抗氧化活性。这可能是由于 F-AXOs 中 FA 结构提供了酚羟基,增强了供氢能力^[35],从而提高了自由基清除率。其中,SE-2min-L 和 SE-5min-L 组的 DPPH 清除能力分别低于相应 SE-2min-S 和 SE-5min-S 组($p < 0.05$),说明汽爆过程中更多抗氧化成分保留于固体部分,后续水热处理可从固体中释放更多 FA。

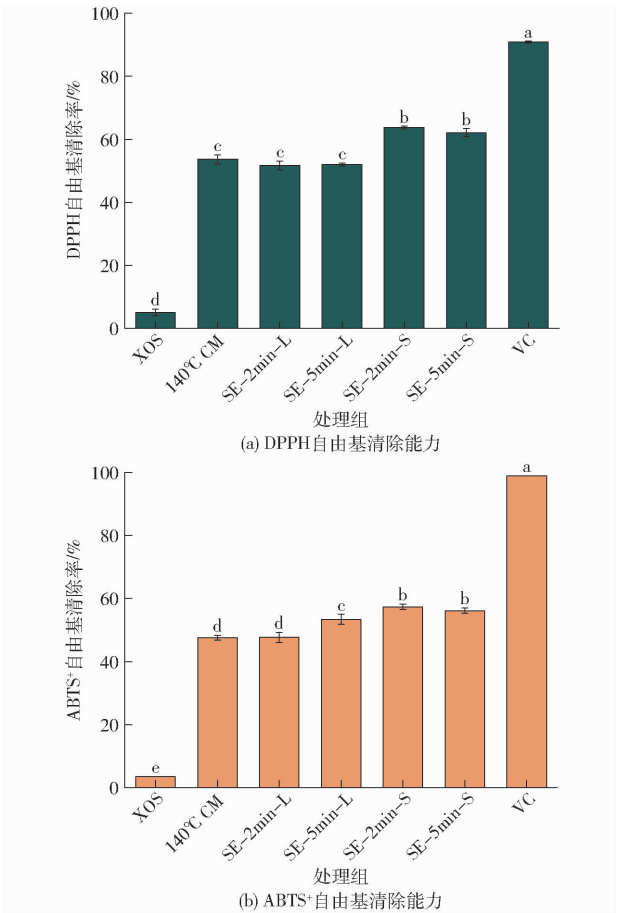


图 5 不同预处理玉米皮产物的抗氧化活性
Fig.5 Antioxidant activity of corn husk products from different pretreatment

如图 5b 所示,不同预处理水热产物对 ABTS⁺ 自由基的清除率与其对 DPPH 自由基的清除能力呈现相似趋势。SE-2min-S 和 SE-5min-S 组表现出最强的 ABTS⁺ 自由基清除能力(接近 60%),显著优于 140℃ 处理的 CM 组及 SE-2min-L 和 SE-5min-L 组($p < 0.05$)。这可能是源于较高聚合度的 F-AXOs 因其分子空间构象限制了阿魏酰基团的自由取向,从而降低了 FA 的抗氧化效能^[36];此外,

提取物中较高的清除活性亦可归因于其他生物活性化合物的存在,如香豆酸、阿魏酸脱氢二聚体或其他羟基肉桂酸^[37]。总体而言,蒸汽爆破预处理能显著提升水热产物对 ABTS⁺ 自由基的清除能力,且效果明显优于同浓度 XOS 对照($p < 0.05$)。

2.4.2 益生元活性

图 6 是不同预处理玉米皮水热产物益生元活性的评价结果。如图 6a 所示,体外发酵实验进行至 8 h 取样时,CM 组与 XOS 组均未检测到 SCFAs 产生。相比之下,汽爆组的样品产 SCFAs 速率更快,这可能是由于汽爆预处理产生的 F-AXOs 促进了双歧杆菌、粪杆菌等有益微生物增殖,并抑制了与疾病相关细菌的生长。双歧杆菌是人类肠道菌群中最具益生功能的属之一,可利用寡糖和多糖代谢产生丁酸盐和乳酸盐。蒸汽爆破短时预处理样品 SCFAs 总量更高,这可能源于汽爆预处理降解产生的低聚糖中阿魏酰基含量较高。阿魏酰基含量是影响 F-AXOs 益生功效的关键因素,其含量越高,对有害菌的抑制作用及对有益菌(如双歧杆菌)的促进效果越强^[38]。如图 6b 所示,体外发酵进行至 16 h 取样时,CM 组与 XOS 组均检测到丁酸产生。此外,SE-2min-L 组和 SE-5min-L 组产生了丙酸。然而,SE-2min-S 组和 SE-5min-S 组 SCFAs 浓度随发酵时间延长而降低,这可能是由于后期发酵环境中营养物质过度消耗,导致微生物群落代谢速率下降,从而影响了 SCFAs 的持续合成;同时,微生物亦可能将部分 SCFAs 作为碳源再利用^[39]以维持生存,进一步降低了 SCFAs 的净浓度。

2.4.3 质量核算

图 7 是汽爆-水热预处理玉米皮产物的质量平衡图。由图 7 可得,玉米皮汽爆-水热制备 F-AXOs 工艺的物料平衡,初始投入 1 t 玉米皮原料(含葡聚糖 285.50 kg、半纤维素 290.70 kg 及蛋白质/木质素等 423.80 kg)。经脱淀粉/蛋白处理后,获得 693.00 kg 物料(含葡聚糖 138.60 kg、半纤维素

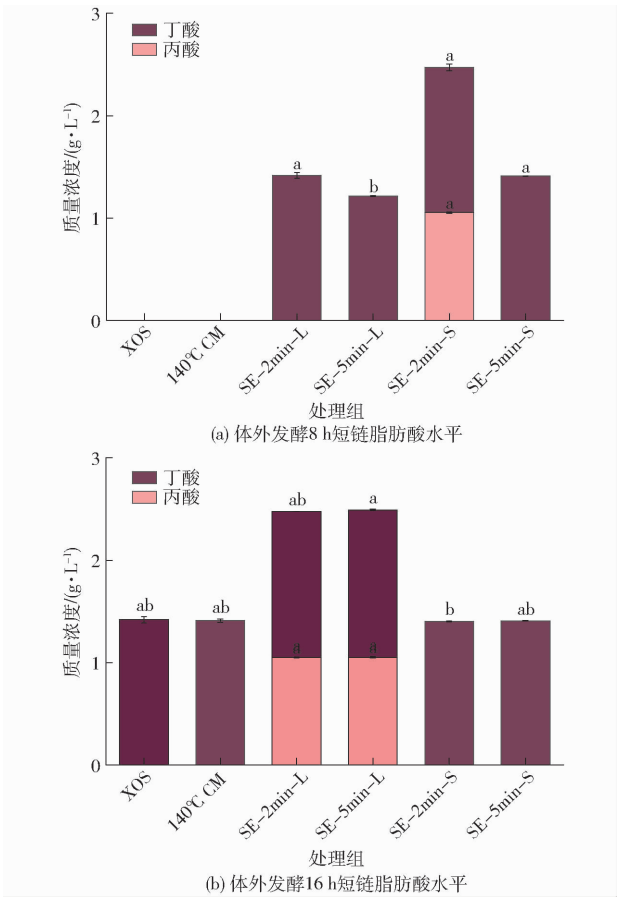


图 6 不同预处理玉米皮产物体外发酵的 SCFAs 水平
Fig. 6 Short-chain fatty acid levels in vitro fermentation of corn husk products from different pretreatment

257.65 kg、其他物质 296.75 kg), 本环节损失 307.00 kg。该物料经蒸汽爆破处理,产出干物质固体 661.39 kg,同时获得提取液 2 724.85 L(含葡萄糖 1.30 kg、低聚糖 12.15 kg),汽爆环节总损失 18.16 kg。随后将 661.39 kg 汽爆固体进行水热处理,最终产物包含葡萄糖 14.75 kg、低聚糖 210.70 kg 及残渣 237.10 kg,本环节损失 198.84 kg。全流程累计输出产物 476.00 kg,总质量损失 524.00 kg(损失率 52.40%),最终获得低聚糖产物 222.85 kg(汽爆固体水热产物低聚糖 210.70 kg + 汽爆提取液低聚

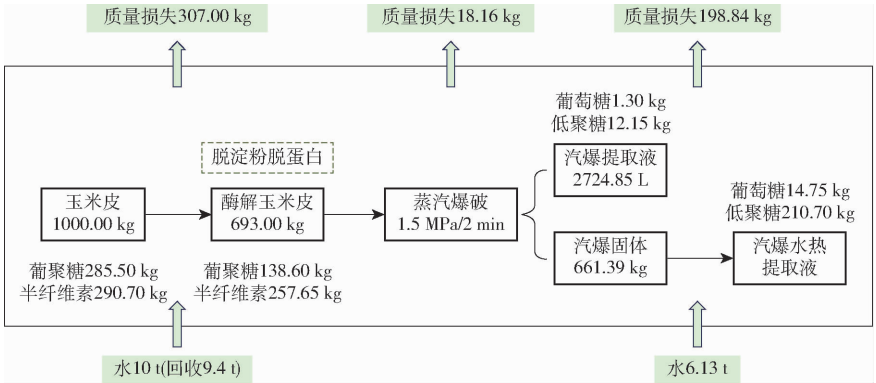


图 7 汽爆-水热预处理玉米皮的总体质量平衡

Fig. 7 Overall mass balance of steam explosion – hydrothermal pretreated corn husk

糖 12.15 kg)。

3 结 论

- (1) 低压短时汽爆显著促进 F-AXOs 生成。在 1.5 MPa 汽爆压力下保压 2 min 时,液体产物中 F-AXOs 浓度达峰值(11.48 mmol/L);相同汽爆条件下,固体残渣经水热转化所得 F-AXOs 浓度高达 11.56 mmol/L。
- (2) 理化结构表征揭示汽爆预处理的增效机制。提高汽爆压力或延长保压时间可有效水解半纤维素结构($1\,241\text{ cm}^{-1}/1\,736\text{ cm}^{-1}$ 特征峰减弱)并断裂糖苷键($1\,033\text{ cm}^{-1}/1\,164\text{ cm}^{-1}$ 特征峰衰减),促使纤维素无定形区及半纤维素显著降解(物料结晶度由 21.24% 最高提升至 35.19%),从而强化后续水热过程中低聚糖的溶出效率。
- (3) 汽爆-水热协同工艺显著提升低聚糖得率。汽爆预处理可直接释放大量低聚糖,在 1.5 MPa 压

- 力下保压 2 min 时,汽爆-水热产物的低聚糖浓度及得率均达最高,低聚糖得率为 76.11%,证实了该协同工艺在糖转化效率方面的显著优势。
- (4) 各预处理样品(140℃ CM、SE-2min/5min-S/L)对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除能力均显著优于同浓度 XOS 对照组($p < 0.05$)。其中 SE-2min-S 样品表现最为突出,对两种自由基清除率均在 60% 左右,显著高于其他汽爆及汽爆-水热处理组。体外发酵实验表明,在发酵初期(8 h),140℃ CM 组与 XOS 组均未检出 SCFAs,而汽爆处理组已快速生成以丁酸为主的 SCFAs。至发酵中期(16 h),汽爆固体组分(SE-2min-S/SE-5min-S)的 SCFAs 浓度随发酵时间延长呈下降趋势,表明其可能被肠道微生物优先作为碳源代谢利用,同时部分汽爆液体组分(SE-2min-L/SE-5min-L)检测到丙酸积累,揭示了不同组分间代谢路径的差异性。

参 考 文 献

[1] 顾珂珂,成俊林,何贝贝,等. 玉米加工副产物饲用价值提升技术研究进展[J]. 饲料研究, 2023, 46(21): 170-174.
Gu Keke, Cheng Junlin, He Beibei, et al. Research progress on technology of raising feed value of corn processing by-products[J]. Feed Research, 2023, 46(21): 170-174. (in Chinese)

[2] 刘宽博,施晶晶,何贝贝,等. 玉米皮及发酵玉米皮的营养特性及研究进展[J]. 饲料工业, 2023, 44(3): 17-22.
Liu Kuanbo, Shi Jingjing, He Beibei, et al. Research progress on nutritional characteristics of corn bran and fermented corn bran[J]. Feed Industry, 2023, 44(3): 17-22. (in Chinese)

[3] Wang L, Liu H M, Xie A J, et al. Dietary fiber extraction from defatted corn hull by hot-compressed water[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2018, 68(2): 133-140.

[4] Ziegler-Devin I, Chrusciel L, Brosse N. Steam explosion pretreatment of lignocellulosic biomass; a mini-review of theoretical and experimental approaches[J]. Frontiers in Chemistry, 2021, 9: 705358.

[5] Zhao G, Kuang G, Wang Y, et al. Effect of steam explosion on physicochemical properties and fermentation characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)[J]. LWT, 2020, 129: 109579.

[6] Pazo-Cepeda M V, Aspromonte S G, Alonso E. Extraction of ferulic acid and feruloylated arabinoxyloligosaccharides from wheat bran using pressurized hot water[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101374.

[7] 张博华,马超,张明,等. 蒸汽爆破技术应用现状研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(7): 31-34, 38.
Zhang Bohua, Ma Chao, Zhang Ming, et al. The application status of steam explosion technology[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(7): 31-34, 38. (in Chinese)

[8] 聂昌宏,郑欣,阿依居来克·卡得尔,等. 考马斯亮蓝法检测不同乳中乳清蛋白含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(5): 1138-1142.
Nie Changhong, Zheng Xin, Ayijulaike Kadeer, et al. Determination of whey protein content in different kinds of milk by coomassie brilliant blue method[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(5): 1138-1142. (in Chinese)

[9] 孙元琳,白宇仁,蔡文强,等. 玉米芯功能性低聚糖分级纯化及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 63-69.
Sun Yuanlin, Bai Yuren, Cai Wenqiang, et al. Fractional purification and antioxidant activity of functional oligosaccharides from corn cob[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2): 63-69. (in Chinese)

[10] 胡林林. 麦麸阿魏酰低聚糖改善炎症性肠病的屏障机制研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2023.
Hu Linlin. Study on the barrier mechanism of wheat bran feruloyl oligosaccharides in improving inflammatory bowel disease [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2023. (in Chinese)

[11] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass[J]. Lab. Anal. Proced, 2008, 1617(1): 1-16.

[12] Gulcin İ, Alwasel S H. DPPH radical scavenging assay[J]. Processes, 2023, 11(8): 2248.

[13] Yue P, Hu Y, Tian R, et al. Hydrothermal pretreatment for the production of oligosaccharides; a review[J]. Bioresource Technology, 2022, 343: 126075.

[14] Ahn J H, Jung K H, Lim E S, et al. Recent advances in microbial production of medium chain fatty acid from renewable carbon resources: a comprehensive review[J]. Bioresource Technology, 2023, 381: 129147.

[15] Fotsop C G, Tchuifon T D R, Kouteu P A N, et al. Investigation of steam explosion pretreatment on spectroscopic, thermodynamic, and textural properties of lignocellulosic biobased materials during a thermal degradation[J]. Biomass

- Conversion and Biorefinery, 2025, 15(22): 28631–28649.
- [16] 张晨曦, 马燕, 马相杰, 等. 阿魏酸及其复合物制备研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 176–183.
Zhang Chenxi, Ma Yan, Ma Xiangjie, et al. Research progress in the preparation of ferulic acid and its complexes[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 176–183. (in Chinese)
- [17] 贺永惠, 王清华, 黄会丽, 等. 蒸汽爆破提高小麦麸皮中水溶性戊聚糖含量及热重分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 286–291.
He Yonghui, Wang Qinghua, Huang Huili, et al. Steam explosion increasing water soluble pentosan content of wheat bran and its thermogravimetric analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 286–291. (in Chinese)
- [18] Ramos L P. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials[J]. Química Nova, 2003, 26(6): 863–871.
- [19] Singh J, Suhag M, Dhaka A. Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 624–631.
- [20] Yan F, Tian S, Du K, et al. Preparation and nutritional properties of xylooligosaccharide from agricultural and forestry byproducts: a comprehensive review[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 977548.
- [21] He Y, Zhang H, Ding K, et al. Composition analysis and prediction of sulfuric acid-assisted steam-exploded corn stover slurry: guiding parameters selection[J]. Process Biochemistry, 2025, 161: 126–138.
- [22] Ale S, Dhungana P, Howieson J, et al. Effective valorisation of cereal lignocellulosic waste: a review of pretreatment techniques to enhance microstructural modification[J]. Sustainable Food Technology, 2026, 4(1): 241–260.
- [23] Chen K, Huang C, Li C, et al. Effects of hydrothermal combined *Trametes versicolor* pretreatment on the physicochemical properties, pyrolysis behavior, and product characteristics of corn cobs[J]. Chemical Engineering Science, 2026, 330: 123960.
- [24] Auxenfans T, Crônier D, Chabbert B, et al. Understanding the structural and chemical changes of plant biomass following steam explosion pretreatment[J]. Biotechnology for Biofuels, 2017, 10(1): 36.
- [25] Ngasotter S, Xavier K A M, Porayil L, et al. A green chemistry route to chitin nanocrystals and nanofibers using steam explosion and organic acid hydrolysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 357: 151465.
- [26] Chen H Z, Liu Z H. Steam explosion and its combinatorial pretreatment refining technology of plant biomass to bio-based products[J]. Biotechnology Journal, 2015, 10(6): 866–885.
- [27] Valério R, Serra A T, Baixinho J, et al. Combined hydrothermal pre-treatment and enzymatic hydrolysis of corn fibre: production of ferulic acid extracts and assessment of their antioxidant and antiproliferative properties[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113731.
- [28] Luo Y, Fan J, Budarin V L, et al. Microwave-assisted hydrothermal selective dissolution and utilisation of hemicellulose in *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens*[J]. Green Chemistry, 2017, 19(20): 4889–4899.
- [29] 钟禹, 朱若楠, 任俊莉, 等. 一种适用于多种农业生物质的汽爆高效低能耗预处理工艺的研究[J]. 生物质化学工程, 2024, 58(5): 11–20.
Zhong Yu, Zhu Ruonan, Ren Junli, et al. An efficient and low-energy pretreatment process for steam explosion applicable to a variety of agricultural biomasses[J]. Biomass Chemical Engineering, 2024, 58(5): 11–20. (in Chinese)
- [30] Li C, Cao H, Wu W, et al. Expression and characterization of α -L-arabinofuranosidase derived from *Aspergillus awamori* and its enzymatic degradation of corn byproducts with xylanase[J]. Bioresource Technology, 2023, 384: 129278.
- [31] Carvalho A F A, Marcondes W F, De Oliva Neto P, et al. The potential of tailoring the conditions of steam explosion to produce xylo-oligosaccharides from sugarcane bagasse[J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 221–229.
- [32] Rochón E, Cabrera M N, Scutari V, et al. Co-production of bioethanol and xylosaccharides from steam-exploded eucalyptus sawdust using high solid loads in enzymatic hydrolysis: effect of alkaline impregnation[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 175: 114253.
- [33] Zhang H, Zhang R, Song Y, et al. Enhanced enzymatic saccharification and ethanol production of corn stover via pretreatment with urea and steam explosion[J]. Bioresource Technology, 2023, 376: 128856.
- [34] Tian X Y, Liu J F, Wu N N, et al. Effect of steam explosion treatment on structural and physicochemical properties, and potential application of soluble dietary fiber from grain and oil processing by-products: a review[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(3): 437–449.
- [35] Zhao W, Chen H, Wu L, et al. Antioxidant properties of feruloylated oligosaccharides of different degrees of polymerization from wheat bran[J]. Glycoconjugate Journal, 2018, 35(6): 547–559.
- [36] 邓奉红, 胡秀婷, 罗舜菁, 等. 阿魏酰阿拉伯低聚木糖的制备、结构鉴定及构效关系研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 303–311.
Deng Fenghong, Hu Xiuting, Luo Shunjing, et al. Research progress on preparation, characterization and structure-activity relationship of feruloylated arabinoxylan oligosaccharides[J]. Food Science, 2023, 44(21): 303–311. (in Chinese)
- [37] Ruthes A C, Rudjito R C, Rencoret J, et al. Comparative recalcitrance and extractability of cell wall polysaccharides from cereal (wheat, rye, and barley) brans using subcritical water[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(18): 7192–7204.
- [38] Zhang H, Hou Y, Liu T, et al. Strategic alteration of arabinoxylan feruloylation enables selective shaping of the human gut microbiota[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110818.
- [39] Liu W, Yang H, Ye J, et al. Short-chain fatty acids recovery from sewage sludge via acidogenic fermentation as a carbon source for denitrification: a review[J]. Bioresource Technology, 2020, 311: 123446.