

机械加工对燕麦 β -葡聚糖理化特性 及体外发酵的影响

Effects of mechanical processing on the physicochemical properties of oat β -glucan and its in vitro fermentation

李 航¹ 王 晶¹ 程安玮¹ 王旭峰² 罗凯云¹

LI Hang¹ WANG Jing¹ CHENG Anwei¹ WANG Xufeng² LUO Kaiyun¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:目的: 研究机械加工对燕麦 β -葡聚糖理化特性和体外发酵特性的影响。方法: 通过钢切、压片、研磨等机械加工方式分别制得燕麦粗粒、燕麦片、燕麦粉, 采用扫描电镜观察微观结构, 测定燕麦 β -葡聚糖的含量、溶出率和相对分子质量, 体外模拟结肠环境进行燕麦发酵。结果: 燕麦粗粒的 β -葡聚糖总含量和溶出率均高于燕麦米, 而燕麦片和燕麦粉的 β -葡聚糖总含量低于燕麦米, 但溶出率高于燕麦米。燕麦米具有较低的发酵速率, 产酸产气速率明显低于燕麦粗粒、燕麦片、燕麦粉, 虽然发酵产生的总短链脂肪酸含量最低, 但丙酸和丁酸含量显著高于其他 3 组。结论: 机械加工可以通过改变燕麦细胞壁结构完整性及 β -葡聚糖的含量和溶出率, 进而影响其体外发酵特性, 适度加工有助于燕麦健康功效的发挥。

关键词: 燕麦; 加工; β -葡聚糖; 体外发酵

Abstract: **Objective:** To evaluate the effects of mechanical processing on the physicochemical properties of oat β -glucan and its in vitro fermentation. **Methods:** Oat coarse grains, oat flakes, and oat flour were respectively produced through mechanical progressing methods such as steel cutting, table pressing, and grinding. Then, scanning electron microscopy was used to observe the microstructure, the content, dissolution rate and relative molecular weight of oat β -glucan were determined, and the colon environment was simulated in vitro for fermentation.

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 32001681); 湖南省自然科学基金(编号: 2022JJ40175)

作者简介: 李航, 女, 湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 罗凯云(1988—), 女, 湖南农业大学讲师, 博士。

E-mail: l.k.y.12800@163.com

收稿日期: 2024-02-06 **改回日期:** 2024-04-16

Results: The total β -glucan content and dissolution rate of steel-cutting oat were higher than those of untreated sample. The total β -glucan content of oat flake and oat flour were lower than untreated oat, but the dissolution rate was higher than it. Untreated oat showed a lower fermentation rate, with a significantly lower acid and gas production rate than those of steel-cutting oat, oat flake, and oat flour. The total short chain fatty acid content of untreated oat produced by fermentation was the lowest, but the content of propionic acid and butyric acid was significantly higher than the other three groups. **Conclusion:** Mechanical progressing can affect the in vitro fermentation characteristics of oats by altering the integrity of their cell wall structure, as well as the content and dissolution rate of β -glucan. Moderate processing can contribute to the health benefits of oats.

Keywords: oat; processing; β -glucan; in vitro fermentation

燕麦是一种复杂的食品基质, 含有多种营养成分和丰富的植物化学物, 能够降低心血管疾病、肥胖、糖尿病等慢性代谢类疾病发生的风险^[1-2]。一般来说, 燕麦需要通过加工以确保食用安全性、便利性和适口性。燕麦加工可以分为物理加工和生物加工, 物理加工主要包括去皮、磨粉、热加工、红外处理、脉冲电场处理和超高压处理等^[3]。物理加工破坏谷粒结构(细胞壁破裂)能够促进更多的 β -葡聚糖释放而促进其健康效应, 但同时也会加速淀粉的消化, 从而增加餐后血糖, 不利于血糖平衡, 导致产品的健康功效难以预测^[4]。

β -葡聚糖是燕麦中一种重要的非淀粉碳水化合物, 主要分布于麸皮和胚乳中^[5-6]。燕麦 β -葡聚糖在小肠中不被消化, 可在结肠中被肠道菌群利用, 产生短链脂肪酸,

乙酸是机体能量的重要来源,提供了人体约 10% 的总能量,丙酸进入血液后,参与肝脏中丙酮酸逆转产生葡萄糖的过程,丁酸为肠道上皮细胞提供了 60%~70% 的能量来源,维持肠道内壁的完整性,增强肠道屏障功能,促进肠道健康^[7-10]。为了发挥其作用, β -葡聚糖必须从食物基质中释放出来并水合,在胃肠道增加肠道内容物黏度,这会对胃排空率、肠道转运时间和营养吸收率产生影响^[11]。Mäkeläinen 等^[12]研究报道,燕麦 β -葡聚糖可以减少小肠对碳水化合物吸收,降低餐后血糖反应的峰值。Regand 等^[13]发现,在淀粉类食物中加入燕麦 β -葡聚糖能够改变淀粉在体内的消化速率。此外, β -葡聚糖可以通过改变肠道微生物群的组成,降低代谢紊乱^[14]。

加工方式对燕麦营养成分的影响是目前的研究热点,加工处理以及与食品基质中其他成分相互作用的差异会影响燕麦产品中 β -葡聚糖的量、溶出率、相对分子质量和结构,进而影响黏度。发芽^[15]、发酵^[16]、挤压膨化^[17]、热处理(微波、烘焙和蒸煮)^[18]等加工方式对燕麦营养成分的影响研究较多,但机械加工对燕麦 β -葡聚糖影响的研究较少。研究拟采用不同机械加工方式制得燕麦米、燕麦粗粒、燕麦片、燕麦粉,探究燕麦加工过程中 β -葡聚糖变化对体外发酵的影响,以期寻求生产高质量燕麦产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料

燕麦米:十月稻田燕麦米,市售;

混联 β -葡聚糖试剂盒:爱尔兰 Megazyme 公司;

β -葡聚糖标准品:美国 Sigma 公司;

果胶酶:500 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司;

蛋白酶:800 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司;

α -淀粉酶:1.5 U/mg,美国 Sigma 公司;

PBS 磷酸盐缓冲液:雷根生物技术有限公司;

低聚果糖、氯高铁血红素、维生素 K 和刃天青:上海源叶生物科技有限公司;

细菌学蛋白胨、酵母浸膏:广东环凯微生物科技有限公司;

六水氯化钙:分析纯,麦克林生化科技有限公司;

无水乙醇、氯仿、正丁醇、氯化钠、七水硫酸镁、刚果红、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、猪胆盐、L-半胱氨酸、无水硫酸铜、氢氧化钠(片状)、碳酸氢钠、吐温 80、肌醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 试验仪器

电子分析天平:PR223ZH/E 型,奥豪斯仪器(常州)有限公司;

高速粉碎机:FW100 型,天津市泰斯特仪器有限

公司;

面条机:MT40-1 系列,石家庄西美特炊事机械制造有限公司;

扫描电子显微镜:JSM-IT200 型,日本电子株式会社;

恒温振荡器:THZ-C-1 型,苏州培英实验设备有限公司;

pH 计:FE28 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

厌氧培养箱:YQX-II 型,上海龙跃仪器设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 燕麦样品的制备 燕麦粗粒,使用刀片将燕麦米切割成有裂口的若干块米粒;燕麦片,压面机挤压燕麦米制得燕麦片(厚度为 0.5 mm);燕麦粉,将燕麦米置于高速粉碎机中研磨,过 50 目筛(全麦粉)。

1.2.2 扫描电镜(SEM)观察燕麦样品的微观结构 通过 SEM 观察燕麦米、燕麦米粗粒、燕麦片和燕麦粉的表面微观结构及其形态。先对冷冻干燥的燕麦样品进行喷金处理,在 10 kV 的电压下,选择不同倍数进行扫描电镜观察。

1.2.3 燕麦 β -葡聚糖的提取及测定 采用热水浸提法,参考王如月等^[19]的方法稍作修改,首先使用乙醇回流 2 h ($V_{\text{样品}}:V_{\text{乙醇}}=1:10$),使用 2 倍体积的乙醇真空洗涤沉淀,收集沉淀,在 45 °C 下干燥过夜;沉淀用 80 °C 热水浸提 2 h,收集两次离心上清液,加入果胶酶($V_{\text{上清液}}:V_{\text{果胶酶}}=1:0.012$)除去燕麦溶液中的果胶,离心(5 500 r/min, 10 min)收集上清液,在溶液中加入 α -淀粉酶(0.5 g/100 mL)去除淀粉,在悬浮液中加入叠氮化钠(0.02 g/100 mL)过夜;在悬浮液中加入 3 倍体积的无水乙醇,过夜;旋转悬浮液浓缩至原体积的 1/10,离心(5 000 r/min, 10 min)收集沉淀,沉淀复水,使用酶法结合 Sevag 法除蛋白质,加入 3 倍体积的无水乙醇,4 °C 过夜后离心取沉淀,真空冷冻干燥得到 β -葡聚糖。

1.2.4 燕麦 β -葡聚糖溶出率的测定 参考韩勤英^[20]的方法稍作修改,称取 β -葡聚糖标准品,配制成 0.1 mg/mL 的 β -葡聚糖标准溶液,稀释成 5, 10, 15, 20, 25, 30 $\mu\text{g/mL}$ 的 β -葡聚糖标准溶液,向每支试管中加入 4 mL 0.1 g/L 的刚果红溶液,反应 10 min,在 550 nm 下测定吸光值,绘制 β -葡聚糖标准曲线。另取 3 组试管,称取 50 mg 燕麦样品(准确记录实际重量),加入 10 mL 蒸馏水,在 37 °C 磁力搅拌 4 h,随后 4 500 r/min 离心 20 min,收集上清液,在 550 nm 处测得吸光值,代入 β -葡聚糖标准曲线方程,计算得到 β -葡聚糖含量,再根据已测得的 β -葡聚糖含量按式(1)计算 β -葡聚糖溶出率。

$$R = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R —— β -葡聚糖溶出率, %;

m_1 —— β -葡聚糖溶出量, mg;

m_2 —— β -葡聚糖含量, mg。

1.2.5 燕麦 β -葡聚糖相对分子质量测定 采用体积排阻色谱法(SEC),利用配备紫外吸收检测器(UV)和示差折光检测器(RI)的多角度激光光散射仪(multi-angle laser light scattering, MALLS),以 0.1 mol/L 硝酸钠作为流动相,流速 0.5 mL/min,柱温 40 °C。

1.2.6 燕麦样品体外发酵试验 体外模拟结肠发酵培养基和发酵过程参考 Pérez-Burillo 等^[21]的方法略作修改。

(1) 发酵培养基配制:蛋白胨 2 g,酵母浸膏 2 g,氯化钠 0.1 g,磷酸二氢钾 0.04 g,磷酸氢二钾 0.04 g,七水硫酸镁 0.01 g,六水氯化钙 0.1 g,碳酸氢钠 2 g,吐温 80 2 mL,氯高铁血红素 0.025 g,维生素 K 10 μ L,刃天青 4 mL,猪胆盐 0.5 g, L-半胱氨酸 0.5 g, pH 调节至 7.0 $\pm$ 0.1 后,蒸馏水定容至 1 L, 121 °C 高压灭菌 20 min。

(2) 肠道微生物来源:采集健康志愿者两男一女(20~28 岁、至少 3 个月未服用抗生素、无消化系统疾病)的新鲜粪便,加入无菌 0.1 mol/L pH 7 的 PBS 缓冲液($V_{\text{粪便}}:V_{\text{PBS 缓冲液}}=1:10$)浸泡 5 min,混合涡旋后使用 4 层无菌纱布过滤。

(3) 体外发酵过程:将糊化后的燕麦样品(2 g/100 mL)放入培养基中,以低聚果糖作阳性对照,以蒸馏水作阴性对照。菌液与培养基等比例加入发酵瓶中,于 37 °C 的厌氧培养箱中孵育,分别在发酵 0, 6, 12, 24, 48 h 时取出,同时加入 0.2 mL 硫酸铜(0.5 g/100 mL, 内含 12.5 mg/mL 肌醇)终止微生物发酵,测定发酵液 pH 值和产气量。发酵液离心(4 °C、11 000 r/min、10 min),上清液、沉淀于-80 °C 保存。

1.3 数据处理

每项试验均独立重复 3 次,使用 Origin 2019 进行图表绘制和 SPSS 27.0 进行单因素方差分析,表示为“平均值 $\pm$ 标准差”, $P<0.05$ 被认为是在统计学上样品之间具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 机械加工对燕麦样品微观结构的影响

如图 1 所示,燕麦米谷粒细胞壁完整,表面光滑平整,有清晰的细胞壁纹路,内部结构排列整齐,淀粉颗粒被细胞壁分隔在致密的胚乳细胞中。燕麦粗粒谷粒被切割为若干颗粒,露出淀粉横截面,部分细胞壁断裂,有小颗粒的淀粉附着在表面,这是由于切割过程中导致部分

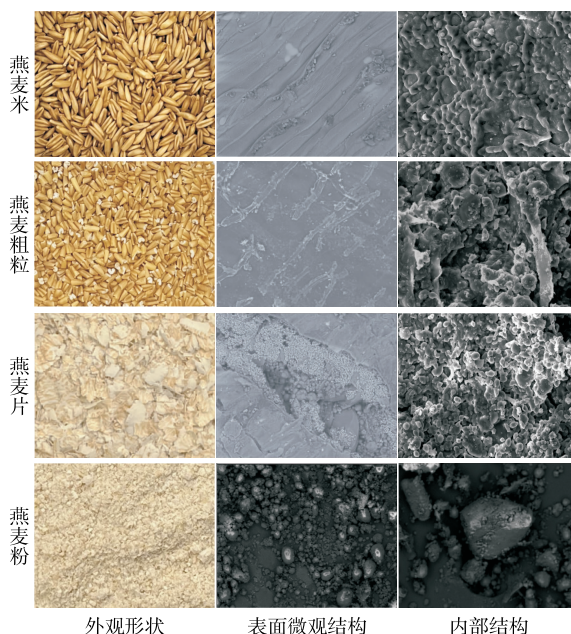


图 1 不同物理结构燕麦样品的微观结构图

Figure 1 Microstructure diagrams of oats with different physical structures ($\times 500$)

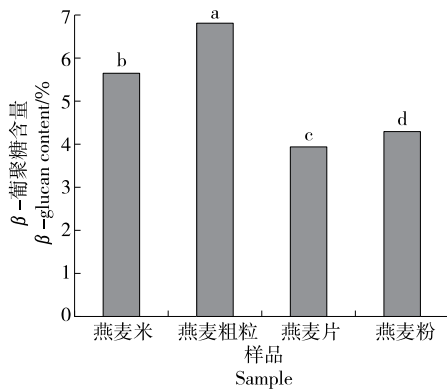
细胞壁破裂,淀粉颗粒被释放。燕麦片细胞壁结构完整性较差,呈现疏松多孔的状态,可能是压片过程中大量燕麦细胞壁被破坏导致淀粉的有序结构被破坏,大量淀粉颗粒被释放出来。燕麦粉由于细胞壁结构完全被破坏,被细胞壁包裹的淀粉完全被释放出来,淀粉呈现无序的状态。综上所述,不同的机械加工方式改变了燕麦的微观结构,这可能会对燕麦 β -葡聚糖的溶出率产生影响,进而影响燕麦的体外发酵特性。

2.2 机械加工对燕麦 β -葡聚糖含量的影响

如图 2 所示,燕麦粗粒 β -葡聚糖含量是燕麦米的 1.2 倍,可能是因为加工研磨过程破坏细胞壁结构进而导致淀粉等部分营养物质的损失,但促进了 β -葡聚糖的释放^[22]。燕麦片和燕麦粉 β -葡聚糖含量显著低于燕麦米的,约减少了 30%, 24%,可能由于压片和研磨处理会更大程度地破坏燕麦麸皮细胞壁,激活内源性 β -葡聚糖水解酶,提高酶促反应,导致氧化链断裂引发降解,从而引起 β -葡聚糖损失^[23]。陈中伟等^[24]研究发现燕麦制粉会损失大量的 β -葡聚糖,与试验结果一致。说明只有适度加工燕麦米才能更好地保留营养物质。

2.3 机械加工对燕麦 β -葡聚糖溶出率的影响

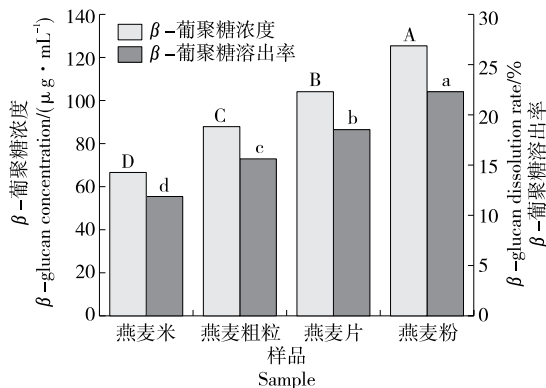
由于人体胃排空时间为 4~6 h,故选取燕麦样品中 β -葡聚糖溶出条件为:37 °C,搅拌 4 h。由图 3 可知,燕麦米中 β -葡聚糖在溶解过程中未完全从燕麦细胞壁释放。加工导致 4 种燕麦样品的葡聚糖溶出率具有显著差异(燕麦粉>燕麦片>燕麦粗粒>燕麦米)。压片和研磨过



字母不同代表存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图2 不同物理结构燕麦 β -葡聚糖的含量(干基)

Figure 2 The content of β -glucan in oats with different physical structures (dry basis)



字母不同代表存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图3 不同物理结构燕麦的 β -葡聚糖浓度和溶出率

Figure 3 The concentration and dissolution rate of β -glucan of oat of different physical structures

程提高了燕麦组织细胞壁释放和溶解 β -葡聚糖的速率与程度,可能是细胞壁结构被破坏, β -葡聚糖酶降解天然附着在谷物中的 β -葡聚糖和其他细胞壁多糖,导致 β -葡聚糖释放出来,增加了其溶解度^[25]。此外,有研究^[26]表明,加工过程中燕麦 β -葡聚糖的 β -(1,3)-(1,4)键的序列被打破,促进了水分子渗入到分子链中,更易溶解于水中。可以推论,加工导致燕麦中 β -葡聚糖的存在形式和排布位置存在差异,燕麦细胞结构破坏程度与 β -葡聚糖溶出率呈正相关。

2.4 机械加工对燕麦 β -葡聚糖相对分子质量的影响

如表1所示,燕麦粗粒与燕麦米的 β -葡聚糖相对分子质量无显著性差异,而燕麦片和燕麦粉的 β -葡聚糖相对分子质量显著小于燕麦米,约减小了37.3%,43.8%。这一结果表明,机械加工对 β -葡聚糖的相对分子质量有较大的影响,过度加工能够降低燕麦 β -葡聚糖的相对分

表1 不同物理结构燕麦 β -葡聚糖的相对分子质量[†]

Table 1 Relative molecular weights of oat β -glucans with different physical structures

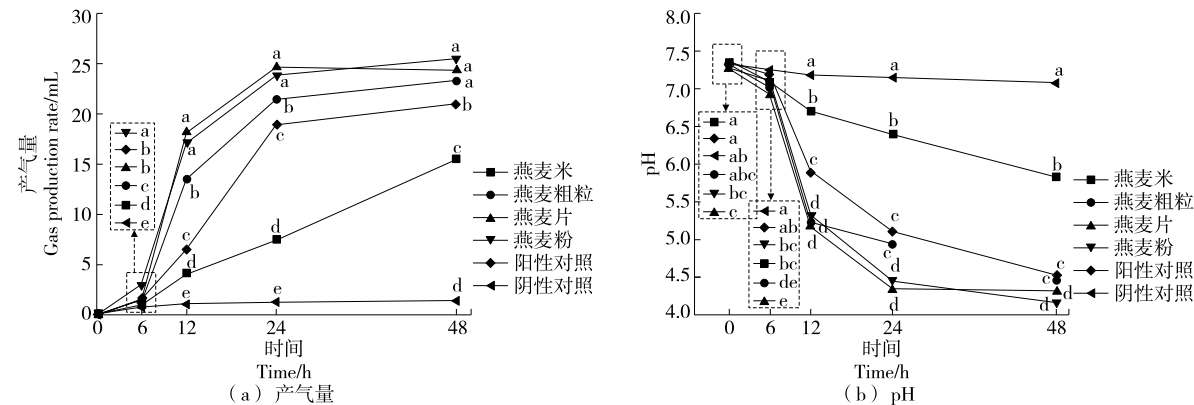
样品	平均相对分子质量	相对分子质量	面积百分比/%
燕麦米	11 523.67±20.94 ^a	20 339.00±120.67 ^a	99.17±0.06 ^c
燕麦粗粒	8 881.67±55.77 ^b	19 882.33±59.80 ^a	99.06±0.06 ^c
燕麦片	6 312.00±23.51 ^c	12 737.33±76.05 ^b	99.57±0.06 ^b
燕麦粉	6 606.67±73.27 ^c	11 429.00±140.68 ^c	99.43±0.06 ^a

[†] 同列数值后字母不同代表存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

子质量,与Djurle等^[27]的研究结果相一致,过度研磨、辊压、挤压虽然可以增加 β -葡聚糖的得率,但会降低其相对分子质量。李金冉^[28]也提出从研磨的燕麦中提取到的 β -葡聚糖相对分子质量小于未处理燕麦中的观点。申瑞玲等^[29]试验结果表明,低相对分子质量的 β -葡聚糖比高相对分子质量的 β -葡聚糖调节肠道菌群的效果要好,而燕麦 β -葡聚糖水溶液黏度与其生理活性密切相关,产生黏度的能力在很大程度上取决于完全水合的聚合物链的数量和大小。因此,适度的机械加工可通过改变燕麦 β -葡聚糖的相对分子质量而影响其健康功效。

2.5 机械加工对燕麦样品体外发酵特性的影响

2.5.1 产气量和 pH 值 发酵过程中由于微生物代谢产物乙酸、丙酸、丁酸和二氧化碳的释放,因此,单位时间内产气量、产酸量的多少可以反映底物被微生物利用的程度,以此反映底物的营养价值高低^[30]。在体外发酵过程中,微生物群利用不同燕麦样品发酵产生的气体量和 pH 值变化如图4所示。在体外发酵48 h后,燕麦粗粒、燕麦片和燕麦粉的产气量无显著差异,而燕麦米发酵产生的气体量明显低于前三者。在0~24 h可观察到燕麦粗粒、燕麦片和燕麦粉气体积累迅速增加,增加量分别是燕麦米的2.8,3.3,3.1倍。24~48 h时,燕麦米、燕麦粗粒和燕麦粉的产气量均有所增加,但燕麦片的产气量却微量减少,可能是氨气与二氧化碳发生反应,导致气体减少^[31]。0~24 h时,燕麦样品的 pH 快速减小,燕麦片和燕麦粉的 pH 分别从7.27和7.29降至4.34和4.45,分别约降低了40.3%,38.9%,二者无显著性差异。燕麦米的 pH 变化最小,仅从7.37降至6.39,约降低了13.2%。24~48 h时,燕麦样品发酵后的 pH 下降趋势较为平缓,可利用的碳源逐渐减少,达到发酵终点(48 h)时,各组的 pH 值达到最低。整个过程表明,燕麦发酵可降低结肠环境的 pH 值,创造酸性的肠道环境,可能会抑制有害菌的生长和有害酶的活性^[32]。加工后的燕麦在发酵期间的产气量和 pH 值的变化较为显著 ($P < 0.05$),是由于机械加工增大了营养物质与微生物接触的面积与空间,增加了其可利用度。另外,不同物理结构的燕麦在发酵过程中产气量



同一发酵时间的字母不同代表存在显著性差异($P < 0.05$)

图 4 不同物理结构燕麦发酵过程的产气量和 pH

Figure 4 Gas production and pH of oat with different physical structures during in vitro fermentation

和 pH 值的变化相对应,表明燕麦具有较高的营养价值和较好的发酵特性^[33]。由此可知,燕麦粗粒、燕麦片和燕麦粉发酵速率较快,燕麦片和燕麦粉在 24 h 内基本发酵完全,燕麦粗粒 24 h 后有少量底物发酵,而燕麦米体外发酵速率较缓慢,48 h 仍未发酵完全。金妹等^[34]对比了不同粒径的白芸豆皮发酵速率,结果显示粒径小的白芸豆皮发酵速率越快,因为小粒径的底物更易接触到肠道微生物,被充分利用。因此,除了发酵底物的种类和数量外,物理结构的变化也会影响发酵特性。

2.5.2 短链脂肪酸 短链脂肪酸(SCFAs)主要是由结肠内厌氧菌利用碳水化合物酵解产生的重要代谢产物之一,主要包括乙酸、丙酸和丁酸,其浓度会受到饮食和肠道菌群的影响。如表 2 所示,燕麦粗粒、燕麦片和燕麦粉发酵产生的乙酸、丙酸和总短链脂肪酸含量无显著性差异,但

显著高于燕麦米发酵产生的短链脂肪酸。这可能是由于机械加工处理后,燕麦颗粒破裂,改变了燕麦谷粒的物理结构,完整的燕麦米(1.3 mm)被破碎成不同尺寸的形状、呈碎粒状(0.7~1.0 mm)、片状(0.5 mm)和粉状(0.28 mm),增大了燕麦抗性淀粉、 β -葡聚糖等营养物质的生物利用度,增强了肠道微生物的代谢,累积了较多的代谢产物。Stewart 等^[35]发现小而细的底物发酵增加了 SCFAs 的产量,与试验结果一致。虽然燕麦米发酵产生的总短链脂肪酸量最少,但产生的丙酸(4.54 mmol/L)和丁酸(3.75 mmol/L)含量显著高于其他组。试验中燕麦米的产酸能力与 Tuncil 等^[36]研究中粗麦麸(粒径 >1.7 mm)的产酸能力相似,在接种发酵 48 h 产生的丁酸浓度显著高于细麦麸(粒径 <0.18 mm)。因此,机械加工能够影响燕麦在大肠中肠道菌群的发酵速率和代谢产物,进而达到一定的健康益处。

表 2 不同物理结构燕麦体外发酵 48 h 的短链脂肪酸含量[†]

Table 2 Content of short chain fatty acids produced by in vitro fermentation of oats with different physical structures for 48 h mmol/L

样品	乙酸	丙酸	丁酸	总短链脂肪酸
燕麦米	21.506±0.397 ^c	4.549±0.672 ^a	3.753±0.158 ^a	29.810±1.089 ^b
燕麦粗粒	37.456±2.763 ^a	0.793±0.080 ^c	0.795±0.145 ^e	39.045±2.698 ^a
燕麦片	39.466±2.140 ^a	0.609±0.022 ^c	1.009±0.075 ^d	41.084±2.208 ^a
燕麦粉	39.582±2.146 ^a	0.513±0.909 ^c	0.892±0.092 ^{de}	40.988±1.124 ^a
阳性对照	25.753±1.540 ^b	0.778±0.070 ^c	1.182±0.028 ^c	27.714±1.555 ^b
阴性对照	8.798±0.454 ^d	2.033±0.068 ^b	2.262±0.014 ^b	13.093±0.409 ^c

[†] 同列数值后字母不同代表存在显著性差异($P < 0.05$)。

3 结论

研究结果表明,机械加工能够改变燕麦的微观结构和粒径大小,破坏细胞壁结构,影响燕麦 β -葡聚糖的释放速率和程度,且微观结构破坏程度与 β -葡聚糖溶出率正相关。燕麦 β -葡聚糖已被证明具有降低空腹血胆固醇浓

度,这主要是因为近端肠道的消化物黏度增加。因此,燕麦 β -葡聚糖的溶解速率和程度以及浓度和分子大小对其生理活性具有重要意义。体外发酵试验表明不同燕麦样品的体外发酵速率及产生短链脂肪酸的含量与组成不同,可能是由于机械加工程度导致物理结构差异及 β -葡聚糖的黏度差异影响肠道微生物的代谢速率。综上所述

述,不同程度机械加工可能通过改变燕麦的细胞结构完整性影响 β -葡聚糖的溶出率和相对分子质量,进而影响肠道内容物的黏度,通过调节肠道微生物的代谢速率来影响能量代谢而起到不同的健康功效。

参考文献

- [1] WOLEVER T M, JENKINS A L, PRUDENCE K, et al. Effect of adding oat bran to instant oatmeal on glycaemic response in humans: A study to establish the minimum effective dose of oat β -glucan[J]. *Food & Function*, 2018, 9(3): 1 692-1 700.
- [2] TOSH S M. Review of human studies investigating the post-prandial blood-glucose lowering ability of oat and barley food products[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2013, 67(4): 310-317.
- [3] 温瑞雪, 宋伟, 罗卓婷, 等. 不同加工处理方式对燕麦营养成分影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4): 295-303.
WEN R X, SONG W, LUO Z T, et al. Research progress on effects of different progressing methods on nutritional components of oats [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(4): 295-303.
- [4] GRUNDY M M L, FARDET A, TOSH S M, et al. Processing of oat: The impact on oat's cholesterol lowering effect [J]. *Food & Function*, 2018, 9(3): 1 328-1 343.
- [5] 樊蕊. β -葡聚糖复合凝胶的超高压/热诱导制备技术及其性状评价[J]. *食品与机械*, 2019, 35(2): 15-20, 61.
FAN R. The ultrahigh-pressure/thermally induced technologies of the β -glucan mixed gel and the evaluation system for their properties[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(2): 15-20, 61.
- [6] RAGUINDIN P F, ITODO O A, STOYANOV J, et al. A systematic review of phytochemicals in oat and buckwheat[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127982.
- [7] 申瑞玲, 朱莹莹, 李林. 燕麦 β -葡聚糖调节肠道菌群与降脂减肥作用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(8): 364-366, 373.
SHEN R L, ZHU Y Y, LI L. Research progress in the intestinal flora and anti-obesity effect of oat β -glucan[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(8): 364-366, 373.
- [8] FROST G, SLEETH M L, SAHURI-ARISOYLU M, et al. The short-chain fatty acid acetate reduces appetite via a central homeostatic mechanism[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3 611.
- [9] ZHANG F, ZHAO Y G, WANG H, et al. Alterations in the milk metabolome of dairy cows supplemented with different levels of calcium propionate in early lactation [J]. *Metabolites*, 2022, 12 (8): 699.
- [10] ZHANG L, LIU C D, JIANG Q Y. Butyrate in energy metabolism: There is still more to learn [J]. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 2021, 32(3): 159-169.
- [11] LAITINEN M, MÄKELÄ-SALMI N, MAINA N H. Gelation of cereal β -glucan after partial dissolution at physiological temperature: Effect of molecular structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 141: 108722.
- [12] MÄKELÄINEN H, ANTTILA H, SIHVONEN J, et al. The effect of β -glucan on the glycemic and insulin index[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2007, 61(6): 779-785.
- [13] REGAND A, CHOWDHURY Z, TOSH S M, et al. The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility [J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 297-304.
- [14] WANG Y N, AMES N P, TUN H M. High molecular weight barley β -glucan alters gut microbiota toward reduced cardiovascular disease risk[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 171563.
- [15] 田斌强, 邓乾春, 谢笔钧. 发芽燕麦淀粉的分子结构与体外消化性[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(6): 87-91.
TIAN B Q, DENG Q C, XIE B J. Molecular structure and in vitro digestibility of geiminated oat starch[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(6): 87-91.
- [16] 刘燕, 罗游, 魏岱岳, 等. 红曲菌固态发酵对燕麦多糖体外抗氧化及抑制淀粉酶活性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(5): 95-101, 130.
LIU Y, LUO Y, WEI D Y, et al. Effect of solid-state fermentation with monascus anka on the compositions, in vitro antioxidation and amylase-inhibitory activity of oat polysaccharides[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(5): 95-101, 130.
- [17] 汪新洁, 刘凤杰, 郑俊, 等. 不同挤压膨化温度对燕麦片风味成分的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(6): 188-196, 309.
WANG X J, LIU F J, ZHENG J, et al. Effects of different extrusion temperatures on the flavor components of oatmeal [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(6): 188-196, 309.
- [18] 顾军强, 钟葵, 周素梅, 等. 不同热处理燕麦片风味物质分析[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(4): 282-288, 62.
GU J Q, ZHENG K, ZHOU S M, et al. Effects of various heat treatments on volatile compounds in oatmeal [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(4): 282-288, 62.
- [19] 王如月, 余讯, 徐静静, 等. 燕麦 β -葡聚糖及其寡糖对肠道菌群结构和代谢的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(11): 85-91, 97.
WANG R Y, YU X, XU J J, et al. Effects of oat β -glucan and its oligosaccharides on composition and metabolism of intestinal microorganisms[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46 (11): 85-91, 97.
- [20] 韩勤英. β -葡聚糖的检测方法及结果对比分析[J]. *中外酒业*, 2015(11): 29-31.
HAN Q Y. Assay methods and comparative analysis of results for β -gulan[J]. *Global Alcinfo*, 2015(11): 29-31.
- [21] PÉREZ-BURILLO S, MOLINO S, NAVAJAS-PORRAS B, et al. An in vitro batch fermentation protocol for studying the contribution of food to gut microbiota composition and functionality[J]. *Nature Protocols*, 2021, 16(7): 3 186-3 209.

- [22] GUUNDY M M L, QUINT J, RIEDER A, et al. Impact of hydrothermal and mechanical processing on dissolution kinetics and rheology of oat β -glucan[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 166: 387-397.
- [23] CYRAN M R, SNOCHOWSKA K K. Evidence of intermolecular associations of β -glucan and high-molar mass xylan in a hot water extract of raw oat groat [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 272: 118463.
- [24] 陈中伟, 汪玲, 牛瑞, 等. 裸燕麦米和燕麦粉加工所得麸皮中 β -葡聚糖和酚酸的分布[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 1-6.
CHEN Z W, WANG L, NIU R, et al. Distribution of β -glucan and phenolic acids in oat bran (*Avena nuda*) from the processing of oat roce and oat flour[J]. Food Science, 2018, 39(10): 1-6.
- [25] HENRION M, FRANCEY C, LÊ K A. Cereal β -glucans: The impact of processing and how it affects physiological responses[J]. Nutrients, 2019, 11(8): 1 729.
- [26] ZHAO Y, ZHOU H M, HUANG Z H. Different aggregation states of barley β -glucan molecules affects their solution behavior: A comparative analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105543.
- [27] DJURLE S, ANDERSSON A A, ANDERSSON R. Milling and extrusion of six barley varieties, effects on dietary fibre and starch content and composition[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 72: 146-152.
- [28] 李金冉. 食品加工对燕麦 β -葡聚糖理化性质和生理活性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 3.
LI J R. The influence of food processing on the physicochemical and physiological properties of oat β -glucan [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021: 3.
- [29] 申瑞玲, 王章存, 姚惠源. 燕麦 β -葡聚糖对小鼠肠道菌群的影响[J]. 食品科学, 2005(2): 208-212.
- SHEN R L, WANG Z C, YAO H Y. Effect of oat β -glucan on intestinal flora in mice[J]. Food Science, 2005(2): 208-212.
- [30] BHATTARAI R R, DHITAL S, WILLIAMS B A, et al. In vitro fermentation of legume cells and components: Effects of cell encapsulation and starch/protein interactions [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106538.
- [31] MCALLISTER T A, NEWBOLD C J. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2008, 48(2): 7-13.
- [32] BAI J Y, LI Y, ZHANG W H, et al. Source of gut microbiota determines oat β -glucan degradation and short chain fatty acid-producing pathway[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 101010.
- [33] ABBEELE P V D, KAMIL A, FLEIGE L, et al. Different oat ingredients stimulate specific microbial metabolites in the gut microbiome of three human individuals in vitro[J]. ACS Omega, 2018, 3(10): 12 446-12 456.
- [34] 金姝, 张斌, 高彤, 等. 粒径和含结合酚不溶性膳食纤维对白芸豆皮体外发酵特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 118-127.
JIN S, ZHANG B, GAO T, et al. Effect of particle size and phenolics bounded-insoluble dietary fiber on the in vitro fermentation properties of white kidney bean skin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 118-127.
- [35] STEWART M L, SLAVIN J L. Particle size and fraction of wheat bran influence short-chain fatty acid production in vitro[J]. British Journal of Nutrition, 2009, 102(10): 1 404-1 407.
- [36] TUNCIL Y E, THAKKAR R D, MARCIA A D R, et al. Divergent short-chain fatty acid production and succession of colonic microbiota arise in fermentation of variously-sized wheat bran fractions[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16655.
- (上接第 19 页)
- [16] MA Y L, TONG L T, LI J, et al. Comparison of γ -aminobutyric acid accumulation capability in different mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties under heat and relative humidity treatment, and its correlation with endogenous amino acids and polyamines [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 56(4): 1 562-1 573.
- [17] 邱硕, 贾富国, 韩燕龙, 等. 糙米发芽前含水率提升工艺优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 345-350.
QIU S, JIA F G, HAN Y L, et al. Optimization of moisture increase technique for brown rice before its germination [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 345-350.
- [18] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 207-219.
- [19] LI Y, CHE G, WAN L, et al. Effects of a combined processes of low-pressure steam enrichment and low-pressure superheated steam drying on the γ -aminobutyric acid content of japonica rice [J]. Journal of Chemistry, 2022, 2 022: 8196654.
- [20] MIZUNO H, FUKUMORI T, LIU K, et al. The influence of heating and humidifying by humidified air on GABA generation and quality in paddy [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2012, 74(3): 226-233.
- [21] 王斐. 发芽糙米的生产工艺研究及热风干燥设备的改进[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 54.
WANG F. Study on production technology of germinated brown rice and improvement of hot air drying equipment[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 54.
- [22] MIAH M, HAQUE A, DOUGLASS M, et al. Parboiling of rice part I: Effect of hot soaking time on quality of milled rice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37: 527-537.
- [23] LI H Y, FITZGERALD M A, PRAKASH S, et al. The molecular structural features controlling stickiness in cooked rice, a major palatability determinant[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43713.