

蒸汽爆破燕麦体外消化特性及其对高脂诱导小鼠肥胖的影响

王 晶¹ 匡楚玉¹ 夏智慧¹ 蔡嘉茹¹ 王旭峰² 罗凯云¹

(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)

摘要: [目的] 探讨蒸汽爆破预处理对燕麦微观结构、 β -葡聚糖含量、淀粉消化特性及其对高脂饮食小鼠肥胖的影响。[方法] 考察不同压力 (0.3, 0.5 MPa) 和时间 (30, 60, 90 s) 的蒸汽爆破处理对燕麦微观结构和 β -葡聚糖构成的影响, 并模拟高脂饮食环境下蒸汽爆破燕麦的肥胖抑制作用。[结果] 蒸汽爆破能够破坏燕麦细胞壁有序结构, 增加慢消化淀粉含量、水溶性 β -葡聚糖含量和溶出率, 减少抗性淀粉含量, 且与蒸汽爆破强度呈正相关; 0.5 MPa 下, 水溶性 β -葡聚糖含量和溶出率最高。蒸汽爆破燕麦干预高脂饮食喂养小鼠, 可降低高脂饮食小鼠的体重增长, 与 HFD 相比, 体重变化率最高可降低 10.5%, 并减少肝脏脂肪沉积。[结论] 蒸汽爆破可优化燕麦微观结构, 提高水溶性 β -葡聚糖含量, 改善淀粉消化特性, 并显著抑制高脂饮食诱导的小鼠肥胖。

关键词: 燕麦; 蒸汽爆破; 淀粉消化率; 抗肥胖

In vitro digestion characteristics of steam-exploded oats and their effects on obesity induced by high-fat diet in mice

WANG Jing¹ KUANG Chuyu¹ XIA Zhihui¹ CAI Jiaru¹ WANG Xufeng² LUO Kaiyun¹

(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)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of steam explosion pretreatment on the microstructure of oats, the content of β -glucan, the digestion characteristics of starch, and its effect on obesity in mice fed a high-fat diet. [Methods] The effects of steam explosion treatment under different pressures (0.3, 0.5 MPa) and time (30, 60, 90 s) on the microstructure of oats and the composition of β -glucan are investigated, and the obesity inhibitory effect of steam-exploded oats in a simulated high-fat diet environment is studied. [Results] Steam explosion can destroy the ordered structure of the oat cell wall, increase the content of slowly digestible starch, the content and dissolution rate of water-soluble β -glucan, and reduce the content of resistant starch. It is positively correlated with the intensity of the steam explosion. At 0.5 MPa, the content and dissolution rate of water-soluble β -glucan are the highest. The intervention of steam-exploded oats in mice fed a high-fat diet can reduce the body weight gain of these mice. Compared with the high-fat diet group, the highest reduction in body weight can reach 10.5%, and it can also reduce fat deposition in the liver. [Conclusion] Steam explosion can optimize the microstructure of oats, increase the content of water-soluble β -glucan, improve the digestion characteristics of starch, and significantly inhibit obesity in mice induced by a high-fat diet.

Keywords: oat; steam explosion; starch digestibility; anti-obesity

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

通信作者: 罗凯云 (1988—), 女, 湖南农业大学讲师, 博士。E-mail: kaiyunluo@hunau.edu.cn

收稿日期: 2025-02-27 改回日期: 2025-04-28

引用格式: 王晶, 匡楚玉, 夏智慧, 等. 蒸汽爆破燕麦体外消化特性及其对高脂诱导小鼠肥胖的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 121-126.

Citation: WANG Jing, KUANG Chuyu, XIA Zhihui, et al. *In vitro* digestion characteristics of steam-exploded oats and their effects on obesity induced by high-fat diet in mice[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 121-126.

全谷物燕麦是公认的有益谷物,具有降低餐后血糖及调节脂代谢的功效,此外,还具有预防癌症、糖尿病和胃肠道疾病的作用^[1-2]。中国传统燕麦食品加工方法存在过度精细化,导致燕麦中大量营养成分(如膳食纤维、维生素、矿物质、多酚及其他植物营养素)流失^[2]。

蒸汽爆破是一种高效且清洁的木质纤维素原料预处理技术^[3]。蒸汽爆破在气相蒸煮阶段的热化学反应(利用高温高压)和瞬间爆破阶段的机械撕裂的双重作用下,可对原料进行热化学—机械改性^[4],提高麦麸、米糠等谷物加工副产物的使用价值^[5]。Li等^[6]研究发现,蒸汽爆破可以提高甘薯抗消化淀粉含量。Xie等^[7]研究表明,经蒸汽爆破处理后,青稞粉的峰值黏度、崩解值、最终黏度和回升值均降低。Zhang等^[8]研究发现,蒸汽爆破处理后的燕麦粉具有较高的糊化度、较低的热变形温度和较高的抗剪切性,有利于燕麦粉的加工利用。

蒸汽爆破处理能够在保留谷粒原有结构下最大限度对膳食纤维进行改性^[9]。蒸汽爆破可破坏谷粒细胞壁形成多孔结构,促进果胶、可溶性半纤维素等可溶性膳食纤维溶出,使纤维素、不溶性半纤维素等难溶大分子聚合物的糖苷键断裂水解成可溶性膳食纤维^[10]。燕麦含丰富的膳食纤维,其大多数纤维位于麸皮,而现有加工方式会破坏麸皮,使纤维流失,因此,采用爆破方式,既不会对麸皮产生破坏,还能对纤维达到改性的目的。但有关蒸汽爆破对燕麦膳食纤维的组成改变对其健康功效的影响不明确。研究拟采用蒸汽爆破对燕麦进行处理,探讨蒸汽爆破对其体外消化特性和膳食纤维构成的影响,通过动物试验分析蒸汽爆破燕麦对高脂喂养小鼠体重的影响,为开发具有预防和干预脂代谢紊乱的燕麦健康食品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

燕麦米:五常市彩桥米业有限公司;

小鼠:4周龄雄性 C57BL/6J 小鼠,体重(16±2)g,试验动物生产许可证编号 SCXK(湘)2021-0002,经湖南农业大学动物试验伦理委员会批准,长沙斯莱克景达有限公司;

α -淀粉酶(1.5 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶:美国 Sigma 公司;

总淀粉试剂盒 K-TSTA-50A:爱尔兰 Megazyme 公司;

葡萄糖(Glu)测试盒:南京市建成生物工程研究所;

无水乙醇等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

蒸汽爆破试验台:QB-300 ICSE 型,清正生态科技(苏州)有限公司;

扫描电子显微镜:JSM-IT200 型,日本 JEOL 公司;

电子分析天平:PR223ZH/E 型,奥豪斯仪器(常州)有限公司;

数显恒温磁力搅拌水浴锅:HH-4A 型,常州荣华仪器制造有限公司;

全温振荡器:THZ-C-1 型,苏州培英实验设备有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-5200 型,上海元析仪器有限公司;

全自动生化分析仪:迈瑞 BS-460 型,深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 全谷物燕麦的蒸汽爆破与粉碎处理 将燕麦米装入蒸汽爆破反应装置中关闭反应门。通入水蒸气,在设定压力(0.3, 0.5 MPa)下维持 30, 60, 90 s,然后瞬间释放压力,后经干燥,得到蒸汽爆破全谷燕麦,粉碎,得燕麦粉。

1.2.2 全谷燕麦的结构表征 利用扫描电子显微镜观察蒸汽爆破前后燕麦样品横截面的微观形貌结构。

1.2.3 总 β -葡聚糖和水溶性 β -葡聚糖含量测定 根据试剂盒说明书进行操作。

1.2.4 β -葡聚糖溶出率测定 参照李航等^[11]的方法绘制 β -葡聚糖标准曲线。称取 50 mg 燕麦加入 10 mL 蒸馏水, 37 °C 搅拌 2 h,离心,收集上清,测定 550 nm 处吸光度,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 ——总 β -葡聚糖含量, mg。

1.2.5 蒸汽爆破全谷燕麦淀粉消化特性测定 参照张洁等^[12]的方法。分别按式(2)~式(4)计算快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)含量。

$$S_{RD} = \frac{0.9 \times (G_{120} - G_{FS})}{S_T} \times 100\%, \quad (2)$$

$$S_{SD} = \frac{0.9 \times (G_{120} - G_{20})}{S_T} \times 100\%, \quad (3)$$

$$S_R = \frac{S_T - (S_{RD} + S_{SD})}{S_T} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

S_{RD} ——20 min 内水解的淀粉含量, %;

S_{SD} ——20~120 min 内水解的淀粉含量, %;

S_R ——120 min 内无法水解的淀粉含量, %;

G_{20} ——酶解 20 min 后产生的葡萄糖含量, mg;

G_{120} ——酶解 120 min 后产生的葡萄糖含量, mg;

G_{FS} ——酶解前游离葡萄糖含量, mg;

S_T ——总淀粉质量, mg。

1.2.6 动物试验设计

(1) 试验动物分组和干预:60只雄性小鼠于(25±1)℃、光暗周期12h循环的动物房适应性饲养1周,正常饮食饮水。按照体重均匀将小鼠随机分成6组:普通饮食组(CON)、高脂饲料组(HDF)、燕麦合成组1(HC1,60%高脂饲料+0.3MPa蒸汽爆破30s的燕麦粉)、燕麦合成组2(HC2,60%高脂饲料+0.3MPa蒸汽爆破90s的燕麦粉)、燕麦合成组3(HC3,60%高脂饲料+0.5MPa蒸汽爆破30s的燕麦粉)、燕麦合成组4(HC4,60%高脂饲料+0.5MPa蒸汽爆破90s的燕麦粉),每组10只,共饲养12周。

(2) 血清指标测定:末次给食后,小鼠禁食不禁水饲养12h,各组小鼠使用吸入式麻醉剂异氟烷,眼球取血,室温静置2h,3000 r/min离心10 min,取上清,采用全自动生化分析仪测定血脂四项。

(3) 组织HE染色:记录各组小鼠体重,肝脏质量,采集白色脂肪和肝脏组织样本;小鼠白色脂肪和肝脏组织分别于脂肪固定液、4%多聚甲醛中浸泡48h,用不同梯度的酒精脱水,石蜡包埋,蜡凝固后切成4μm厚的蜡块,切

片,苏木精染色3~5 min,流动水洗涤,脱水,HE染色;光学显微镜观察染色组织,切片分析。

1.3 数据处理

各试验独立重复3次,结果用平均值±标准差表示,使用GraphPad Prism 8.0.2统计分析并作图,多组数据采用SPSS 27.0进行单因素方差分析, $P<0.05$ 说明在统计学上具有显著差异性。

2 结果与分析

2.1 蒸汽爆破对全谷燕麦微观结构的影响

由图1可知,未蒸汽爆破处理的燕麦粒内部结构规律且紧凑,纤维结构排列紧密有序,表面光滑规整,淀粉等颗粒被保护在有序结构内。0.3MPa蒸汽爆破90s和0.5MPa处理后的燕麦细胞壁有序结构被破坏,内部出现深沟,表面疏松粗糙,内部比表面积和孔隙率逐渐增大,破坏现象明显。这可能是高温高压环境下,热蒸气被迅速汽化,渗透到细胞和组织中,瞬间释压时,原料细胞受到巨大的压差,细胞内部压力过大,体积急剧膨胀,远超细胞承受范围,发生类机械断裂^[13]。

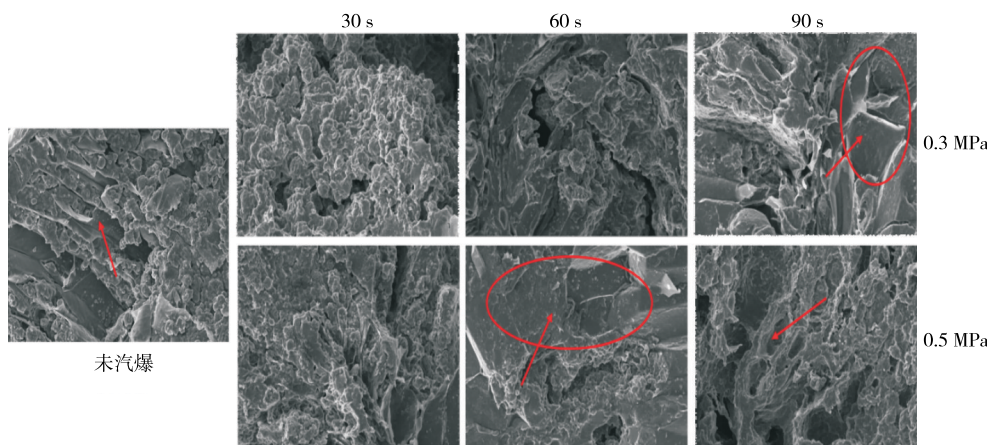


图1 蒸汽爆破全谷燕麦的扫描电镜图

Figure 1 SEM of whole grain oat after steam explosion

2.2 蒸汽爆破对全谷燕麦β-葡聚糖的影响

2.2.1 总β-葡聚糖和水溶性β-葡聚糖含量 β-葡聚糖是燕麦中最重要的膳食纤维,具有增强免疫力、调节血糖、降低胆固醇、促进肠道健康等作用^[14]。由表1可知,蒸汽爆破前后燕麦总β-葡聚糖含量基本一致,无显著性变化,但水溶性β-葡聚糖含量变化显著,且随着蒸汽爆破处理强度的增加逐渐增大,与未处理组相比,0.5MPa蒸汽爆破90s处理组水溶性β-葡聚糖含量增加了71.5%。这是由于蒸汽爆破技术利用高温、高压迅速地改变使得物料瞬间膨胀,从而破坏燕麦细胞壁结构,使包裹在其中的β-葡聚糖更易溶出。同时,爆破瞬间的高温高压会使β-葡聚糖的大分子链断裂,形成相对分子质量较小的水溶性

β-葡聚糖。

2.2.2 β-葡聚糖溶出率 由图2可知,蒸汽爆破前后燕麦β-葡聚糖溶出率变化显著,随蒸汽爆破处理强度的增加而增大,0.5MPa蒸汽爆破60,90s的β-葡聚糖溶出率分别为未处理组的14.45,17.50倍。这主要是因为蒸汽爆破破坏了全谷燕麦的细胞壁,麸皮破裂,水分易于进入,内部物质易于释放,使糊粉层和胚乳细胞内侧区域的β-葡聚糖易于溶出。燕麦中的β-葡聚糖为可溶性膳食纤维的一种,具有较高的溶解性,可增大消化道的黏度,从而对胃排空率、肠道转运时间和营养吸收率产生影响^[15]。此外,β-葡聚糖也可以通过调节脂质代谢相关酶活性,促进短链脂肪酸产生,减少脂肪吸收,进而抑制小鼠肥胖。

表 1 蒸汽爆破全谷燕麦中总β-葡聚糖和水溶性β-葡聚糖含量(干基)[†]
Table 1 Total β-glucan and water-soluble β-glucan content of steam-exploded whole grain oats (dry basis)

组别	总β-葡聚糖	水溶性β-葡聚糖
未处理	2.87±0.10	0.78±0.09 ^c
0.3 MPa 蒸汽爆破 30 s	2.93±0.21	0.88±0.10 ^c
0.3 MPa 蒸汽爆破 60 s	3.14±0.12	2.12±0.11 ^b
0.3 MPa 蒸汽爆破 90 s	3.18±0.13	2.18±0.11 ^b
0.5 MPa 蒸汽爆破 30 s	3.13±0.09	2.20±0.10 ^b
0.5 MPa 蒸汽爆破 60 s	3.32±0.09	2.53±0.10 ^a
0.5 MPa 蒸汽爆破 90 s	3.22±0.11	2.74±0.08 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

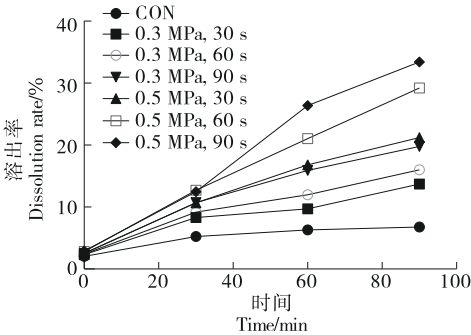


图 2 蒸汽爆破全谷燕麦的β-葡聚糖溶出率
Figure 2 Dissolution rate of β-glucan in steam-exploded whole grain oats

2.3 蒸汽爆破对全谷燕麦淀粉消化特性的影响

淀粉作为为人体机能提供能量的一种功能性大分子,根据消化时间的差异可以分为快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)^[16]。由表 2 可知,未处理组的 RDS、SDS、RS 含量分别为(3.38±0.33)%,(13.77±0.44)%,(82.85±0.88)%。这可能是未蒸汽爆破的燕麦组织结构排列紧密有序,谷物颗粒完整,内部有簇状和双螺旋等结构存在,水分和酶不易渗入,导致淀粉糊化和消化困难^[17]。经蒸汽爆破处理后,RDS 含量随着爆破压力增大与时间延长逐渐增加,RS 含量逐渐减少;SDS 含量随着蒸汽爆破处理强度的增大呈先增加后减少趋势,0.5 MPa 蒸汽爆破 60 s 时达最高,为未处理组的 3.79 倍。这可能是随着蒸汽爆破强度的增大,燕麦内部结构被破坏程度加剧,结晶区被打破,酶与淀粉的接触面积和机率加大,且部分淀粉降解为小分子物质,从而导致 RDS 增多,RS 降低。RDS 多存在于精加工的食物中,食用后,人体血糖水平会迅速升高,从健康角度来说,不宜长期摄入^[18-19]。SDS 对人体健康有积极作用,摄入 SDS

后,可在 20~120 min 内缓慢而持续地释放葡萄糖,有利于血糖平衡和食欲调节^[19]。RS 理论上不能为身体提供葡萄糖,但可促进肠道蠕动,也可被肠道益生菌利用,降低结肠癌、高血脂等的发病率^[20-21],但食用过多会导致消化不良等。因此,不同蒸汽爆破条件均能够影响燕麦中 RDS、SDS 和 RS 含量,导致燕麦具有不同的健康功效。

表 2 蒸汽爆破燕麦中快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉含量(干基)[†]
Table 2 Content of fast, slow and resistant starch in steam-exploded oats (dry basis)

组别	快消化淀粉	慢消化淀粉	抗性淀粉
未处理	3.38±0.33 ^f	13.77±0.44 ^g	82.85±0.88 ^a
0.3 MPa 蒸汽爆破 30 s	8.36±0.64 ^e	25.02±0.82 ^f	66.63±0.84 ^b
0.3 MPa 蒸汽爆破 60 s	13.36±0.47 ^d	33.23±0.45 ^e	53.41±0.89 ^c
0.3 MPa 蒸汽爆破 90 s	14.50±0.66 ^c	44.93±0.33 ^c	40.56±0.85 ^e
0.5 MPa 蒸汽爆破 30 s	13.47±0.71 ^d	38.28±0.91 ^d	48.24±0.58 ^d
0.5 MPa 蒸汽爆破 60 s	21.42±0.25 ^b	52.18±0.95 ^a	26.40±0.82 ^f
0.5 MPa 蒸汽爆破 90 s	27.14±0.80 ^a	50.04±0.47 ^b	22.82±0.60 ^g

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 蒸汽爆破燕麦对小鼠抗肥胖的作用

2.4.1 小鼠体重 由图 3 可知,与对照组相比,基于高脂饮食的 5 组小鼠体重显著增加($P<0.05$),其中 HDP 的最高,HC1 的次之,体重变化率分别提高了 31.6%,21.0%。β-葡聚糖和慢消化淀粉具有抑制肥胖的作用,而 HC2、HC3 和 HC4 抑制肥胖的作用优于 HC1,与 HFD 相比,HC4 的体重变化率下降了 10.5%。说明不同蒸汽爆破条件使得燕麦中慢消化淀粉含量、可溶性β-葡聚糖含量和溶出率的差异导致肥胖的抑制效果不同。

2.4.2 小鼠肝脏和脂肪 肥胖主要以脂肪聚集和脂肪细胞体积增大为主要特征,且脂质会在非脂肪组织沉积。

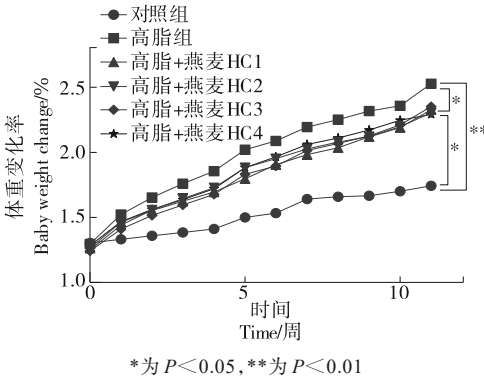


图 3 不同处理燕麦对小鼠体重的影响
Figure 3 Effects of different oat treatments on body weight of mice

由图4可知,大的脂肪滴在高脂饮食喂养小鼠的白色脂肪组织、肝脏中观察到,说明高脂饮食引起了脂肪组织的聚集以及脂肪细胞的增大,且在大量的脂肪细胞的非脂肪

组织中积累。说明蒸汽爆破处理的燕麦可以通过减少肝脏脂肪积累、减少白色脂肪细胞组织中的脂肪细胞大小,预防高脂饮食小鼠异常的脂代谢和肥胖。

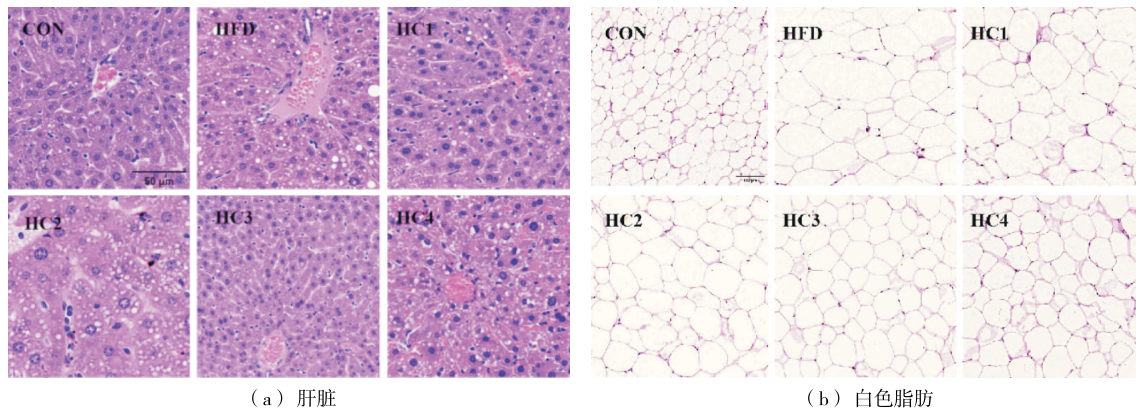


图4 小鼠白色脂肪及肝脏组织的HE染色图

Figure 4 HE staining of white adipose and liver tissue in mice

2.4.3 小鼠血清指标 高脂饮食往往会引起肥胖及脂代谢的变化,总胆固醇过高会影响细胞对胰岛素的敏感性,导致胰岛素抵抗;甘油三酯过多会在体内积累,脂肪细胞会不断增大,从而导致肥胖;高密度脂蛋白具有促进胆固醇逆向转运,将其运回肝脏代谢的作用,从而降低肥胖风险。由表3可知,与对照组相比,HDF小鼠的血清总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白水平显著升高($P<0.05$),高密度脂蛋白显著降低($P<0.05$),说明高脂小鼠出现血脂异常。不同强度蒸汽爆破燕麦饮食干预,能够有效降低血清甘油三酯和总胆固醇水平,与HFD相比HC4的血清甘油三酯和总胆固醇分别降低了50.5%,42.9%,低密度脂蛋白升高了54.7%。说明蒸汽爆破燕麦能够有效预防由高脂饮食引起的小鼠体重增加和血脂水平降低,调节脂代谢。

3 结论

蒸汽爆破能够改变燕麦的微观结构,未处理组的燕

麦内部组织结构排列紧密有序,而经蒸汽爆破处理后,燕麦组织结构被破坏,水溶性 β -葡聚糖含量、 β -葡聚糖溶出率和淀粉的消化特性均发生显著变化($P<0.05$)。随着蒸汽爆破处理强度的增大,水溶性 β -葡聚糖含量、 β -葡聚糖溶出率和快消化淀粉含量增加,慢消化淀粉呈先增加后减少趋势。与高脂小鼠相比,不同蒸汽爆破燕麦干预12周的高脂喂养小鼠体重显著下降($P<0.05$),血脂四项和肝脏、脂肪细胞病理切片也有显著差异($P<0.05$)。综上,蒸汽爆破处理可通过改变全谷燕麦的微观结构、膳食纤维组成和体外消化特性,从而改善脂肪细胞的异位堆积和脂代谢,抑制高脂喂养小鼠的肥胖。后续可研究不同蒸汽爆破条件下燕麦糖脂代谢和抗肥胖的影响规律及作用机制。

参考文献

- [1] YANG C, LI J J, LUO T T, et al. Ultrasonic-microwave assisted extraction for oat bran polysaccharides: characterization and *in vivo* anti-hyperlipidemia study[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 220: 119229.
- [2] LESZCZYŃSKA D, WIRKIJOWSKA A, GASIŃSKI A, et al. Oat and oat processed products: technology, composition, nutritional value, and health[J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11267.
- [3] WANG L, PANG T R, KONG F, et al. Steam explosion pretreatment for improving wheat bran extrusion capacity[J]. Foods, 2022, 11(18): 2850.
- [4] KONG F, LI Y, QIU X R, et al. Enhancement of grindability and physicochemical properties of *Ganoderma lucidum* through steam explosion and its impact on quality characteristics of wheat dough[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 218:

表3 不同处理燕麦对小鼠血清指标的影响[†]

Table 3 Effects of different oat treatments on serum indexes of mice

组别	甘油三酯	总胆固醇	高密度脂蛋白	低密度脂蛋白
CON	1.11±0.06 ^b	3.52±0.11 ^{cd}	2.88±0.16 ^a	0.30±0.08 ^b
HDF	1.86±0.37 ^a	4.99±0.35 ^a	1.17±0.09 ^d	0.50±0.11 ^a
HC1	1.09±0.17 ^b	4.67±0.09 ^{ab}	2.38±0.12 ^c	0.45±0.12 ^a
HC2	0.97±0.17 ^{bc}	4.20±0.11 ^{ab}	2.43±0.12 ^c	0.42±0.12 ^a
HC3	0.77±0.14 ^c	3.81±0.11 ^{bc}	2.64±0.13 ^b	0.43±0.10 ^a
HC4	0.92±0.27 ^{bc}	2.85±0.12 ^d	2.65±0.10 ^b	0.42±0.09 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

- 117485.
- [5] TIAN X Y, LIU J F, QIAO C C, et al. Functional properties and structure of soluble dietary fiber obtained from rice bran with steam explosion treatment[J]. *Journal of Cereal Science*, 2024, 118: 103938.
- [6] LI G L, PANG L L, LI F, et al. Preparation of resistant sweet potato starch by steam explosion technology using response surface methodology[J]. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 2017, 16(5): 1 121.
- [7] XIE Y, ZHU M, LIU H B, et al. Effects of β -glucan and various thermal processing methods on the *in vitro* digestion of hullless barley starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 129952.
- [8] ZHANG Y F, CHEN C, WANG N, et al. Developing a new modification technology of oat flour based on differential pressure explosion puffing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 141: 110967.
- [9] CUI W Y, WANG Y F, SUN Z Y, et al. Effects of steam explosion on phenolic compounds and dietary fiber of grape pomace[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 173: 114350.
- [10] LIN M, WANG C, WU W, et al. Quality, improvement of soluble dietary fiber from *Dictyophora indusiata* by-products by steam explosion and cellulase modification: structural and functional analysis[J]. *Food Chem X*, 2025, 25: 102084.
- [11] 李航, 王晶, 程安玮, 等. 机械加工对燕麦 β -葡聚糖理化特性及体外发酵的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(4): 20-26.
- LI H, WANG J, CHENG A W, et al. Effects of mechanical processing on the physicochemical properties of oat β -glucan and its *in vitro* fermentation[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40 (4): 20-26.
- [12] 张洁, 张根义. 燕麦全麦粉中淀粉消化性的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(2): 171-178.
- ZHANG J, ZHANG G Y. Oat starch digestibility in whole oat flour[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2018, 37 (2): 171-178.
- [13] WANG C R, LIN M F, YANG Q Y, et al. The principle of steam explosion technology and its application in food processing by-products[J]. *Foods*, 2023, 12(17): 3 307.
- [14] LI M, WANG Q S, ZHANG X W, et al. Wheat β -glucan reduces obesity and hyperlipidemia in mice with high-fat and high-salt diet by regulating intestinal flora[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 288: 138754.
- [15] VU V, MUTHURAMALINGAM K, SINGH V, et al. Schizophyllum commune-derived β -glucan improves intestinal health demonstrating protective effects against constipation and common metabolic disorders[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2022, 65(1): 9.
- [16] MA Q, WANG X, ZHANG R F, et al. Structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber from black rice bran treated by different processing methods [J]. *Food Bioscience*, 2025, 65: 106025.
- [17] KONG F, ZENG Q H, LI Y, et al. Effect of steam explosion on nutritional components, physicochemical and rheological properties of brown rice powder[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 954654.
- [18] 李岩, 刘娟, 宋晓凡, 等. β -淀粉酶提高青稞慢消化淀粉含量工艺优化[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 217-222.
- LI Y, LIU J, SONG X F, et al. Optimization the process of increasing the content of slowly digestible starch in highland barley by β -amylase[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(10): 217-222.
- [19] MIAO M, HAMAKER B R. Food matrix effects for modulating starch bioavailability[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12: 169-191.
- [20] LIU J Y, DHITAL S, AHMED JUNEJO S, et al. Structural changes and degradation mechanism of type 3 resistant starch during *in vitro* fecal fermentation[J]. *Food Research International*, 2024, 190: 114639.
- [21] ZENG H L, HE S Q, XIONG Z X, et al. Gut microbiota-metabolic axis insight into the hyperlipidemic effect of lotus seed resistant starch in hyperlipidemic mice[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 314: 120939.