

利用燕麦麸脂肪模拟物制作的发酵香肠对大鼠血脂水平及血清抗氧化性能的影响

杨 敏¹, 杨 勇^{1,*}, 吴世涛², 李彬彬¹, 张 楠¹, 张学广¹, 侯 青¹, 陈 洪¹, 林德荣¹, 刘爱平¹,
刘韞涛¹, 李 健³, 林 燕³

(1.四川农业大学食品学院, 四川 雅安 625014; 2.四川农业大学动物科技学院, 四川 雅安 625014;

3.四川农业大学动物营养研究所, 四川 雅安 625014)

摘 要: 本实验旨在研究利用燕麦麸脂肪模拟物制作的发酵香肠 (oat bran-supplemented fat simulant, OBFS) 与传统发酵香肠 (traditional fermented sausage, TFS) 对正常大鼠血脂水平及血清抗氧化性能的影响。选取平均体质量为 (70±2) g 的健康 Sprague-Dawley (SD) 大鼠 51 只, 随机分成 3 组, 各组分别饲喂在基础饲料中添加 0% (质量分数, 下同) 的 OBFS 及 TFS (基础组)、20% 的 TFS (对照组)、20% 的 OBFS (实验组) 的饲料, 分别在第 0、3、6、9 周测定大鼠的空腹血清总胆固醇 (total cholesterol, TC)、甘油三酯 (triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇 (high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、丙二醛 (malonaldehyde, MDA) 含量、氧化低密度脂蛋白 (oxidized low density lipoprotein, ox-LDL) 质量浓度以及超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 水平。结果显示: 与基础组相比, 实验组大鼠的采食量在第 6、9 周时显著降低 ($P<0.05$), 体质量在第 3 周时显著升高 ($P<0.05$), 第 6、9 周时无显著性差异 ($P>0.05$); TC、TG、LDL-C 含量在第 3、6、9 周时偏低, HDL-C 含量在第 6 周时显著降低 ($P<0.05$), 第 3、9 周时无显著性差异 ($P>0.05$); ox-LDL 质量浓度、MDA 含量在第 3、6、9 周时无显著性差异 ($P>0.05$), SOD 水平在第 9 周时显著升高 ($P<0.05$)。与对照组相比, 实验组大鼠的采食量在第 3、6、9 周时偏低, 体质量在第 9 周时显著降低 ($P<0.05$), TC、TG、LDL-C 含量在第 3、6、9 周时无显著性差异 ($P>0.05$), HDL-C 含量偏高, ox-LDL 质量浓度在第 3 周时显著升高 ($P<0.05$), MDA 含量在第 3、6、9 周时无显著性差异 ($P>0.05$), SOD 水平在第 9 周时显著升高 ($P<0.05$)。证明相比于 TFS 而言, OBFS 具有抑制食欲、控制体质量、促进血清中胆固醇及 TG 的排除和增强血清清除自由基及抗氧化活性的作用。

关键词: 燕麦麸脂肪模拟物; 发酵香肠; 大鼠; 血脂; 脂质过氧化

Effect of Consumption of Fermented Sausage Made with Oat Bran-Supplemented Fat Simulant on Lipid Levels and Serum Antioxidant Status in Rats

YANG Min¹, YANG Yong^{1,*}, WU Shitao², LI Binbin¹, ZHANG Nan¹, ZHANG Xueguang¹, HOU Qing¹, CHEN Hong¹, LIN Derong¹,
LIU Aiping¹, LIU Yuntao¹, LI Jian³, LIN Yan³

(1. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. College of Animal Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

3. Animal Nutrition Institute, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Objective: To study the effect of the ingestion of fermented sausage formulated with oat bran-supplemented fat simulant (OBFS) against traditional fermented sausage (TFS) on lipid levels and antioxidant status in rats. Methods: A total of fifty-one healthy rats with average body weight of (70±2) g were randomly divided into 3 groups: blank, control and experimental groups, which were fed on a basal diet alone or supplemented with 20% OBFS and 20% TFS, respectively. The levels of total cholesterol (TC), triglyceride (TG), low density lipoprotein cholesterol (LDL-C), high density lipoprotein cholesterol (HDL-C), oxidized low density lipoprotein (ox-LDL), malonaldehyde (MDA) and superoxide dismutase (SOD) activity in serum were measured at the end of 0, 3, 6 and 9 weeks. Results: Compared with the blank group, feed intake

收稿日期: 2017-01-07

基金项目: 四川农业大学 2016 年学科建设双支计划项目 (03572094)

第一作者简介: 杨敏 (1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品科学与技术。E-mail: 349909211@qq.com

*通信作者简介: 杨勇 (1969—), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉品科学与技术。E-mail: yangyong676@163.com

significantly decreased after 6 and 9 weeks in the experimental group ($P < 0.05$); body weight significantly increased after 3 weeks ($P < 0.05$), but no significant difference was noted after 6 and 9 weeks ($P > 0.05$); serum TC, TG and LDL-C were lower but not significantly different at all three time points ($P > 0.05$); HDL-C significantly decreased after 6 weeks ($P < 0.05$), but no significant difference was observed at other time points ($P > 0.05$); there was no significant difference in ox-LDL or MDA content at three time points ($P > 0.05$); SOD activity significantly increased after 9 weeks ($P < 0.05$). Compared with the comparison group, feed intake decreased after 3, 6 and 9 weeks in the experimental group, but was not significantly different ($P > 0.05$); body weight significantly decreased after 9 weeks ($P < 0.05$); TC, TG and LDL-C were not significantly different at three time points ($P > 0.05$); HDL-C increased but not statistically significantly after 6 weeks ($P > 0.05$); ox-LDL significantly increased after 3 weeks ($P < 0.05$); no significant difference in MDA was found at all three time points ($P > 0.05$); SOD activity significantly increased after 9 weeks ($P < 0.05$). Conclusion: Compared with TFS, OBFS could suppress appetite, control body weight, enhance serum TC and TG metabolism and increase serum antioxidant status.

Keywords: oat bran-supplemented fat simulant; fermented sausage; rats; lipids; lipid oxidation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201805036

中图分类号: TS251.51

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 05-0239-08

引文格式:

杨敏, 杨勇, 吴世涛, 等. 利用燕麦麸脂肪模拟物制作的发酵香肠对大鼠血脂水平及血清抗氧化性能的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 239-246. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201805036. <http://www.spkx.net.cn>

YANG Min, YANG Yong, WU Shitao, et al. Effect of consumption of fermented sausage made with oat bran-supplemented fat simulant on lipid levels and serum antioxidant status in rats[J]. Food Science, 2018, 39(5): 239-246. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201805036. <http://www.spkx.net.cn>

发酵香肠是经微生物发酵而制成的具有稳定微生物特性和典型发酵香味的肉制品^[1]。但是, 这类肉制品具有较高的脂肪含量(25%~45%)和能量(1 260~1 890 kJ/100 g), 且大多为动物脂肪^[2]。流行病学及实验动物学研究表明, 膳食中脂肪的摄入量与肥胖、动脉粥样硬化、乳腺癌、结肠癌和前列腺癌等有显著的正相关关系^[3-4], 特别是含有大量饱和脂肪酸的动物脂肪, 被认为是引起这些疾病的直接原因; 因此, 为了在降低香肠中脂肪含量的同时不影响其感官特性, 脂肪模拟物成了近年来的研究热点。Choe等^[5]将猪皮和小麦纤维复合物(pigskin fiber mixture, PSFM)制备成脂肪模拟物添加到法兰克福香肠中, 含有20%的PSFM的香肠样品降低了50%的脂肪和32%的能量, 同时减少了39.5%的蒸煮损失, 在色度、风味、多汁性等方面与普通法兰克福香肠无显著性差异。Feng Tao等^[6]将凉粉草胶和大米粉复合物作为脂肪替代品添加到中国广式香肠中, 发现添加有脂肪替代品的样品乳化稳定性和持水能力均优于其他样品, 且总体可接受性与高脂香肠相似。纵观国内外学者的研究发现, 脂肪模拟物较多的应用在乳化香肠中, 在干发酵香肠上的研究较少, 且在国内还鲜见报道。本研究已在前期优化的燕麦麸脂肪模拟物发酵香肠(oat bran-supplemented fat simulant, OBFS)的配方及加工工艺的基础上制作出了在感官品质上与传统干发酵香肠(traditional fermented sausage, TFS)差异不显著的OBFS。

中医认为, 燕麦味苦、性干, 可治虚汗, 能预防多种疾病。现代医学界经过大量的临床观察或动物实验证实了燕麦麸具有降低胆固醇、降血糖、降低胰岛素水平以及抗氧化、预防结肠癌等多种保健功能。Hicks等^[7]以大鼠为研究对象, 饲喂高脂(胆固醇)饲料及高脂和燕麦麸混合饲料3周, 观察燕麦麸对大鼠血清中总胆固醇(total cholesterol, TC)和甘油三酯(triglyceride, TG)含量的影响, 结果表明, 添加燕麦麸能使血清中TC含量下降51.5%, 而使高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)的含量升高13.9%; 裴素萍等^[8]直接将水提取的燕麦 β -葡聚糖以低、中、高剂量(133、266、533 mg/(kg·d))灌喂高脂血症大鼠, 结果表明高剂量组大鼠血清TC和低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein-cholesterol, LDL-C)含量显著降低, 而HDL-C含量显著升高。国内外学者对燕麦麸功能性的研究大多集中在单一功能因子的研究, 鲜见将其制备成肉制品, 探究该肉制品是否具有燕麦麸具有的功效; 因此, 本研究将燕麦麸制备成脂肪模拟物应用到发酵香肠中, 探究发酵香肠对大鼠采食量、体质量、血脂水平及血清抗氧化性能的影响, 以为功能性发酵香肠的开发应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 动物、材料与试剂

无特定病原体(specific pathogen free, SPF)级SD大

鼠, 雄性, 4 周龄, 体质量 (70 ± 2) g, 由达硕实验动物中心 (SCXK (川) 2015-030) 提供。

发酵剂: 葡萄球菌 (*Staphylococcus*)、戊糖片球菌 (*Pediococcus pentosaceus*)、植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*) 均由四川农业大学食品学院肉品研究室从传统四川香肠中分离得到^[9-10], 将 2 种乳酸菌接种到液体 MRS 培养基中, 将葡萄球菌接种到液体 MSA 培养基中, 在 37 °C 条件下活化 12 h, 活化两次后备用。

新鲜猪后腿肉、辣椒、花椒等调味料 雅安农贸市场; 燕麦麸 山西大同市荣康粮油有限公司; 羊肠衣 谭氏百盛食品企业; 高温 α -淀粉酶 上海源叶生物科技有限公司; TC、TG、HDL-C、LDL-C、MDA、SOD 试剂盒 南京建成生物工程研究所; 酶联免疫吸附测定试剂盒 上海容创生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

JA1203 型电子天平 上海越平科学仪器有限公司; DZKW-4 电子恒温水浴锅 北京中兴伟业仪器有限公司; LGJ-18S 冷冻干燥机 宁波新艺超声设备有限公司; HR-02 多功能粉碎机 上海哈瑞斯电器有限公司; LHS-250SC 型恒温恒湿培养箱 上海荣丰科学仪器有限公司; DHG29345A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒公司; PHS-3C 型酸度计 上海仪电科学仪器股份有限公司; SW-GJ-IFD 型超净工作台 苏净集团泰安公司。

1.3 方法

1.3.1 燕麦麸冻干粉的提取

将燕麦麸过 40 目筛, 以 1:15 (m/V) 的比例加水调浆, 均质后在 80 °C 水浴中搅拌 30 min, 再加入 4.8 $\mu\text{mol}/(\text{min} \cdot \text{g})$ 用 50 mg/L 的氯化钙溶液稀释 100 倍的高温 α -淀粉酶进行酶解, 10 min 后在 121 °C 下高温灭酶 10 min, 离心后取上清液于 -30 °C、10 kPa 下冷冻干燥 24 h, 粉碎后得燕麦麸提取物冻干粉^[11]。

通过以上方法得到的燕麦麸冻干粉水分体积分数为 2.78%、粗纤维质量分数为 0.9%、蛋白质量分数为 22.69%、粗脂肪质量分数为 9.99%、灰分质量分数为 2.33%、 β -葡聚糖质量分数为 13.95%。

1.3.2 燕麦麸脂肪模拟物的制备

参考 Ruiz-Capillas 等^[12]的方法, 将 5 g 魔芋胶溶于 64.8 g 的水中, 搅拌机搅拌均匀, 加入 1 g 卡拉胶后混匀; 称取 3 g 燕麦麸提取物冻干粉加入到 16.2 g 的水中, 混合均匀后加入到上述魔芋胶与卡拉胶的混合物中, 搅拌均匀后加入体积分数为 10% 的橄榄油, 搅拌均匀后冷却到 10 °C; 向上述混合物中加入质量分数为 10% 的氢氧化钙溶液至终质量分数为 1%, 混合均匀; 将上述胶体溶液倒入方形模具中, 手动压出空气, 并将其贮存在 (2 ± 2) °C。

1.3.3 发酵香肠的制备

分别制备 TFS (精瘦肉 70%、猪皮下脂肪 30%) 与

OBFS (精瘦肉 70%、猪皮下脂肪 10.5%、燕麦麸脂肪模拟物 19.5%) 2 种发酵香肠。其他辅料添加量 (以质量分数计) 相同: 食盐 2.3%、白砂糖 1.0%、白酒 1.0%、辣椒粉 1.2%、黑胡椒 0.02%、花椒 0.4%、十三香 0.05%、大蒜粉 0.05%、葡萄糖 0.01%、硝酸钠 0.025%、亚硝酸钠 0.007 5%。

发酵香肠制作工艺如下^[13]: 将经过预处理的原料肉切丁于 4 °C 下腌制 4 h, 加入辅料搅拌均匀后加入已活化的菌种 (10^7 CFU/mL), 将混合均匀的猪肉装入浸泡好的羊肠衣中, 于温度 20 °C、相对湿度 75% 下发酵 12 h 后在温度 13 °C、相对湿度 60% 熟化 4 d, 最后在 55 °C 的烘箱中干燥 22 h。通过以上配方及加工工艺制备出的 TFS 能量为 5.81 kJ/g、脂肪质量分数为 39.15%、蛋白质量分数为 24.62%; OBFS 的能量为 3.93 kJ/g、脂肪质量分数为 31.27%、蛋白质量分数为 34.04%。

1.3.4 动物实验

1.3.4.1 动物分组

所有大鼠适应性喂养 7 d 后开始实验。51 只大鼠随机分成 3 组^[14] (基础组、对照组、实验组), 17 只/组, 单笼喂养, 基础组饲喂基础饲料, 对照组饲喂添加了 20% (以质量分数计, 下同) TFS 的饲料, 实验组饲喂添加了 20% OBFS 的饲料; 连续饲喂 9 周, 饲养期间, 动物房温度控制在 (23 ± 2) °C、相对湿度 60% 以及 12 h 昼夜交替; 自由摄食、自由饮水。

1.3.4.2 实验动物饲料配方

基础饲料配方如下: 玉米淀粉 51.7%、大豆粉 21.5%、小麦淀粉 8.8%、鱼粉 2.0%、食盐 0.2%、猪油 2.0%、小麦麸皮 11.0%、复合矿物质 0.03%、赖氨酸 0.12%、复合维生素 0.02%、蛋氨酸 0.13%、氯化胆碱 0.1%、蔗糖 0.1%、磷酸钙 1.0%、碳酸钙 1.3%。添加 20% TFS 的饲料配方为: 基础饲料占 80%、TFS 占 20%; 添加 20% OBFS 的饲料配方为: 基础饲料占 80%、OBFS 占 20%。3 种饲料的各项基础理化指标见表 1。

表 1 不同种类饲料的基础理化指标
Table 1 Calories and chemical indicators of different kinds of fodder

| 指标 | 基础组 | 对照组 | 实验组 |
|--------------|-------|-------|-------|
| 能量/(kJ/g) | 4.17 | 4.69 | 4.36 |
| 脂肪含量/(g/kg) | 96.9 | 182.3 | 145.0 |
| 蛋白质含量/(g/kg) | 231.2 | 234.3 | 253.8 |
| 粗纤维含量/(g/kg) | 32.3 | 32.1 | 32.3 |
| 灰分含量/(g/kg) | 48.3 | 54.0 | 54.6 |

1.3.4.3 样品采集

每日记录大鼠采食量, 并于第 0、3、6、9 周末, 禁食 12 h 后称取体质量, 每组选取 3 只大鼠眼球取血, 分离血清, 血清样品贮存在 -80 °C 待测。

1.3.4.4 血脂水平测定

取1.3.4.3节所采集的大鼠血清样品,对TC、TG、LDL-C、HDL-C含量进行测定,均按照试剂盒说明书方法操作。动脉粥样硬化指数(atherosclerotic index, AI)按照下式计算。

$$AI = \frac{TC \text{ 含量} - HDL-C \text{ 含量}}{HDL-C \text{ 含量}}$$

1.3.5 抗氧化指标测定

取1.3.4.3节所采集的大鼠血清样品,对氧化低密度脂蛋白(oxidized low density lipoprotein, ox-LDL)质量浓度使用酶联免疫吸附测定,MDA含量、SOD水平测定均按照试剂盒说明书方法操作。

1.4 数据处理方法

采用SPSS 20.0软件进行*t*检验和单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 OBFS对大鼠采食量及体质量的影响

表2 OBFS对大鼠采食量的影响
Table 2 Influence of OBFS on daily food intake of male SD rats

| 组别 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
|-----|------------|-------------------------|-------------------------|
| 基础组 | 18.53±0.72 | 21.95±0.86 | 21.91±0.83 |
| 对照组 | 20.11±0.86 | 20.10±0.94 | 18.15±0.81 ^a |
| 实验组 | 19.06±0.82 | 18.46±0.75 ^a | 17.60±0.63 ^a |

注: a.与基础组相比差异显著($P<0.05$)。下同。

各组大鼠在实验期间的采食量见表2,与基础组相比,第3周时实验组大鼠的采食量无显著性差异($P>0.05$),第6、9周时实验组大鼠的采食量显著低于基础组($P<0.05$);对照组在第9周时的采食量显著低于基础组($P<0.05$),第3、6周时与基础组无显著性差异($P>0.05$)。与对照组相比,整个实验阶段,实验组采食量均低于对照组,但差异不显著($P>0.05$)。

表3 OBFS对大鼠体质量的影响
Table 3 Influence of OBFS on body weight of male SD rats

| 组别 | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
|-----|------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 基础组 | 97.54±2.01 | 223.75±6.80 | 345.32±10.00 | 424.54±12.08 |
| 对照组 | 96.90±1.84 | 257.71±5.21 ^a | 379.40±10.19 ^a | 446.96±5.73 |
| 实验组 | 97.51±1.68 | 248.11±6.32 ^a | 352.87±7.98 | 416.87±9.73 ^a |

注: A.与对照组相比差异显著($P<0.05$)。下同。

由表3可知,第0周时,各组间体质量无显著性差异($P>0.05$)。第3周时,实验组大鼠的体质量显著高于基础组($P<0.05$),第6、9周时与基础组大鼠的体质量无显著性差异($P>0.05$);对照组大鼠体质量在第3、6周时显著高于基础组($P<0.05$),第9周时与基础组无显著性差异($P>0.05$)。与对照组相比,第3、6周时

实验组大鼠的体质量差异不显著($P>0.05$),在第9周时,体质量显著低于对照组($P<0.05$)。

2.2 OBFS对大鼠血脂水平的影响

2.2.1 OBFS对大鼠血清TC含量的影响

表4 OBFS对大鼠血清TC含量的影响
Table 4 Effect of OBFS on serum TC of male SD rats

| 组别 | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
|-----|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| 基础组 | 3.13±0.19 | 3.14±0.19 | 2.17±0.02 | 3.65±1.08 |
| 对照组 | 2.41±0.09 | 1.97±0.12 ^a | 1.97±0.24 | 3.97±0.51 |
| 实验组 | 2.67±0.35 | 2.28±0.53 | 1.95±0.17 | 3.02±1.32 |

由表4可知,第0周时,各组间TC含量差异不显著($P>0.05$)。第3、6、9周时,实验组TC含量均低于基础组,但差异不显著($P>0.05$);对照组第3周时TC含量显著低于基础组($P<0.05$),第9周时TC含量高于基础组,但差异不显著($P>0.05$)。与对照组相比,实验组在第0、3周时TC含量高于对照组,第6、9周时TC含量低于对照组,但差异均不显著($P>0.05$)。由此说明,发酵香肠具有稳定血清TC含量的作用,且相比于TFS,OBFS的效果更显著。

2.2.2 OBFS对大鼠血清TG含量的影响

表5 OBFS对大鼠血清TG含量的影响
Table 5 Effect of OBFS on serum TG of male SD rats

| 组别 | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
|-----|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| 基础组 | 0.68±0.11 | 1.04±0.02 | 0.66±0.06 | 0.92±0.26 |
| 对照组 | 0.54±0.11 | 0.57±0.09 ^a | 0.58±0.05 | 0.69±0.05 |
| 实验组 | 0.78±0.19 | 0.60±0.27 | 0.52±0.06 | 0.74±0.14 |

由表5可知,第0周时,各组间TG含量差异不显著($P>0.05$)。第3、6、9周时,实验组TG的含量低于基础组,但差异不显著($P>0.05$);对照组第3周时TG含量显著低于基础组($P<0.05$),第6、9周时均低于基础组,但差异不显著($P>0.05$)。与对照组相比,实验组在第6周时TG含量低于对照组,第3、9周时高于对照组($P>0.05$)。但纵观整个实验阶段可知,实验组TG含量呈先下降后上升的趋势,且第3、6、9周时TG含量均低于第0周,而对照组TG含量呈逐渐上升的趋势。由此可知,OBFS具有降低血清TG含量的作用。

2.2.3 OBFS对LDL-C含量的影响

表6 OBFS对LDL-C含量的影响
Table 6 Effect of OBFS on serum LDL-C of male SD rats

| 组别 | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 基础组 | 0.38±0.07 | 0.56±0.11 | 0.30±0.04 | 0.17±0.02 |
| 对照组 | 0.23±0.00 | 0.42±0.01 | 0.17±0.04 | 0.24±0.03 |
| 实验组 | 0.23±0.02 | 0.46±0.03 | 0.17±0.01 | 0.27±0.03 |

由表6可以看出, 整个实验阶段, 实验组、对照组与基础组间LDL-C的含量无显著性差异 ($P>0.05$), 由此说明, 发酵香肠对大鼠血清中LDL-C含量无影响。

2.2.4 OBFS对HDL-C含量及AI值的影响

表7 燕麦麸脂肪模拟物对发酵香肠HDL-C含量及AI值的影响

Table 7 Effect of OBFS on serum HDL-C and AI of male SD rats

| 周龄 | HDL-C含量/(mmol/L) | | | AI | | |
|----|------------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| | 基础组 | 对照组 | 实验组 | 基础组 | 对照组 | 实验组 |
| 0 | 0.93±0.05 | 0.66±0.04 ^a | 0.88±0.02 | 2.41±0.39 | 2.63±0.16 | 2.02±0.31 |
| 3 | 0.85±0.12 | 0.39±0.04 ^a | 0.58±0.09 | 2.90±0.69 | 4.05±0.35 | 2.64±0.43 |
| 6 | 0.75±0.03 | 0.54±0.07 ^a | 0.50±0.03 ^a | 1.90±0.13 | 2.67±0.31 | 2.95±0.35 ^a |
| 9 | 0.56±0.07 | 0.49±0.01 | 0.56±0.09 | 6.09±2.59 | 7.06±1.14 | 3.93±1.38 |

从表7可以看出, 与基础组相比, 实验组第6周时HDL-C含量显著降低 ($P<0.05$), 第0、3、9周时含量偏低但差异不显著 ($P>0.05$); 对照组整个实验阶段的HDL-C含量均低于基础组, 第0、3、6周时差异显著 ($P<0.05$)。与对照组相比, 实验组大鼠血清中HDL-C含量偏高, 但差异不显著 ($P>0.05$)。由此说明, 相比于TFS, OBFS对HDL-C含量的影响较小; 同时, 由于基础组的HDL-C含量呈现逐渐下降的趋势, 因此, 发酵香肠是否会降低大鼠血清中HDL-C含量有待进一步研究。

AI是国际医学界制定的衡量动脉硬化程度的指标, 它的正常值小于4, 且数值越小反映动脉硬化程度越轻, 引发心血管疾病的危险性越低。从表7可以看出, 第9周时实验组的AI值为3.93, 低于基础组的6.09和对照组的7.06, 说明相比于TFS而言, OBFS有预防心血管疾病的作用。

2.3 OBFS对大鼠血清抗氧化性能的影响

2.3.1 OBFS对大鼠血清中ox-LDL质量浓度的影响

表8 OBFS对ox-LDL质量浓度的影响

Table 8 Effect of OBFS on serum ox-LDL of male SD rats

| 组别 | μg/L | | | |
|-----|------------|-------------------------|------------|--------------------------|
| | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
| 基础组 | 27.67±1.04 | 30.41±4.52 | 22.60±1.53 | 25.55±1.07 |
| 对照组 | 30.93±1.22 | 13.88±0.12 ^a | 24.37±0.60 | 83.54±15.39 ^a |
| 实验组 | 29.04±3.28 | 27.66±3.75 ^a | 25.72±2.38 | 47.16±13.31 |

从表8中可以看出, 第0周时, 各组的ox-LDL质量浓度差异不显著 ($P>0.05$)。与基础相比, 实验组的ox-LDL质量浓度无显著性差异 ($P>0.05$); 对照组在第3周时ox-LDL的质量浓度显著降低 ($P<0.05$), 第9周时显著升高 ($P<0.05$)。与对照组相比, 实验组第3周时的ox-LDL质量浓度显著升高 ($P<0.05$), 第6、9周时无显著性差异 ($P>0.05$)。由此说明, 发酵香肠会导致血清中ox-LDL质量浓度升高, 但相比于TFS, OBFS的影响较小。

2.3.2 OBFS对大鼠血清中MDA含量的影响

由表9可知, 第0周时对照组大鼠血清中MDA含量显

著低于基础组与实验组 ($P<0.05$), 这是大鼠的个体差异导致; 此后的整个实验过程, 实验组、对照组与基础组的MDA含量无显著性差异 ($P>0.05$), 说明TFS与OBFS对大鼠血清中MDA的含量无影响。

表9 OBFS对MDA含量的影响

Table 9 Effect of OBFS on serum MDA of male SD rats

| 组别 | mmol/L | | | |
|-----|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
| 基础组 | 6.15±0.09 | 5.03±0.55 | 3.01±0.34 | 7.01±0.15 |
| 对照组 | 5.12±0.10 ^a | 5.39±0.14 | 2.86±0.16 | 5.55±0.09 |
| 实验组 | 6.24±0.03 ^a | 4.91±0.32 | 3.44±0.45 | 6.15±0.80 |

2.3.3 OBFS对大鼠血清中SOD水平的影响

表10 OBFS对SOD水平的影响

Table 10 Effect of OBFS on serum SOD of male SD rats

| 组别 | mmol/L | | | |
|-----|--------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| | 第0周 | 第3周 | 第6周 | 第9周 |
| 基础组 | 402.72±23.73 | 410.44±50.66 | 393.66±12.65 | 179.19±9.61 |
| 对照组 | 390.04±70.41 | 394.02±34.76 | 463.64±32.46 ^a | 333.83±4.70 |
| 实验组 | 397.10±15.62 | 434.91±24.02 | 335.12±48.45 | 628.77±6.66 ^{aA} |

从表10可知, 第0周时各组大鼠的SOD水平无显著性差异 ($P>0.05$)。与基础组相比, 第9周时实验组大鼠血清中SOD水平显著升高 ($P<0.05$), 第3、6周时无显著性差异 ($P>0.05$); 对照组第6周时SOD水平显著高于基础组 ($P>0.05$), 第3周无显著性差异 ($P>0.05$)。与对照组相比, 实验组第9周时SOD水平显著偏高 ($P<0.05$), 第3、6周时差异不显著 ($P>0.05$)。由此说明, 发酵香肠具有清除体内自由基及抗氧化的作用, 且OBFS的抗氧化效果显著高于TFS。

3 讨论

3.1 OBFS对大鼠采食量及体质量的影响

本研究中各组采食量结果显示, 与基础组相比, 第3周时实验组大鼠的采食量无显著性差异 ($P>0.05$), 第6、9周时实验组大鼠的采食量显著低于基础组 ($P<0.05$)。与对照组相比, 整个实验阶段, 实验组大鼠的采食量低于对照组 ($P>0.05$), 这与张培培^[15]的研究结果一致, 其原因可能与实验组中 β -葡聚糖的添加有关。Vitaglione等^[16]研究结果表明, β -葡聚糖可促进胃肠激素肽 (peptide YY, PYY) 的分泌。Batterham等^[17-18]研究发现, PYY是胃肠末梢分泌的一种激素肽, 可与下丘脑的Y2受体结合, 该受体通过抑制食欲刺激因子神经肽YY的释放, 从而达到抑制食欲的目的。

本研究中各组体质量结果显示, 第3周时, 实验组大鼠的体质量显著高于基础组 ($P<0.05$), 第6、9周

时与基础组大鼠的体质量无显著性差异 ($P>0.05$)。与对照组相比,第0、3、6周时实验组大鼠的体质量差异不显著 ($P>0.05$),第9周时,体质量显著低于对照组 ($P<0.05$),这与孙娟^[19]和董吉林^[20]等的研究结果一致。造成以上结果的可能原因有两点:其一是 β -葡聚糖的添加导致动物营养物质吸收率降低,Dunaif等^[21]研究结果表明,燕麦 β -葡聚糖是一种黏性多糖,可以降低淀粉酶、脂酶和糜蛋白酶的活性,同时肠道内容物的黏性会使小肠黏膜的不动水层增厚,这种作用降低了营养素向小肠绒毛的扩散速率,从而干扰营养物质的吸收;其二为脂肪模拟物的替代导致实验组饲料中的脂肪含量降低,Amine等^[22]的研究结果表明,减少饮食中10%的脂肪比例可以相应的减少238 kJ/d的总能量摄入及3.2 kg左右的体质量,本实验中,实验组饲料的脂肪含量为145 g/kg,小于对照组的182.3 g/kg。综上可知,相比于TFS,OBFS具有抑制食欲、控制体质量的效果。

3.2 OBFS对大鼠血脂的影响

胆固醇在肝脏中的主要代谢途径是转化为胆汁酸,然后胆汁酸盐进入肠道帮助肠内脂类物质消化,其中85%~95%的胆汁被肠道重新吸收入血液返回肝脏,剩余少部分在肠道细菌的作用下被转化为粪固醇直接排出体外。大量的临床研究表明,胆固醇含量过高会增加心脏病的患病风险^[23]。本实验结果表明,与基础组相比,整个实验阶段,实验组的TC、TG含量均低于基础组,但差异不显著 ($P>0.05$);对照组第3周时TC、TG含量显著降低 ($P<0.05$),第6、9周时差异不显著 ($P>0.05$)。与对照组相比,均无显著性差异 ($P>0.05$)。这与Jahreis^[24]和张薇^[25]等的研究结果相似。其原因可能有两方面:一方面为本次实验采用的发酵剂为葡萄球菌、戊糖片球菌及植物乳杆菌,大量研究表明,乳酸菌可通过自身产生的胆盐水解酶介导来抑制胆汁酸重吸收的作用^[26-27],通过提高肝细胞胆固醇7 α -羟化酶活性来加速胆固醇的分解^[28],通过抑制3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶A的活性来降低胆固醇^[29],通过下调肠细胞NPC1L1蛋白表达介导抑制小肠对胆固醇的吸收^[26];另一方面为燕麦 β -葡聚糖的添加,Gallaher等^[30]的研究结果表明, β -葡聚糖是水溶性膳食纤维,可增加小肠内容物的黏度,直接阻碍胆固醇向肠壁黏膜细胞的扩散以及胆汁与胆固醇的乳化作用,较大程度地干扰了膳食胆固醇的吸收,降低胆固醇的吸收率,同时抑制胆汁酸在肠道内的重吸收,促进粪便胆汁酸的排泄,阻断胆汁酸肝肠循环,因而使更多的肝脏胆固醇向胆汁酸转化,最终达到降低血清胆固醇的目的。

LDL-C是诱发冠心病的危险因素之一,当LDL-C含量过高且超过其清除能力时,过量的LDL-C透过血管壁聚集到动脉壁上,发生脂质过氧化反应,改变分子结

构,从而使其易被血管巨噬细胞和平滑肌细胞通过非受体途径吸纳,逐渐在动脉壁沉积下来,最终形成动脉粥样硬化。但是较高含量的HDL-C有助于肝脏胆汁酸的分泌,排除多余的胆固醇,同时HDL-C和LDL-C竞争性争夺血管内皮细胞的受体,也能起到预防动脉粥样硬化的作用^[31]。本研究中,基础组、对照组、实验组的LDL-C含量均无显著性差异 ($P>0.05$)。但是对HDL-C含量而言,与基础组相比,实验组第6周时的HDL-C含量显著降低 ($P<0.05$),对照组第3、6周时显著降低 ($P<0.05$)。与对照组相比,实验组大鼠血清中HDL-C含量偏高,但差异不显著 ($P>0.05$)。这与申瑞玲^[32]和汪海波^[33]等的研究结果不一致。申瑞玲等^[32]以实验性高胆固醇大鼠为实验对象,分别饲喂添加不同剂量的燕麦 β -葡聚糖,探究其对大鼠血脂及生长的影响,结果表明,给予不同剂量 β -葡聚糖对HDL-C含量无显著影响。汪海波等^[33]以正常小鼠及四氧嘧啶致糖尿病小鼠为研究对象,灌胃不同剂量的燕麦 β -葡聚糖,观察其对小鼠血脂的影响,研究结果表明,与正常对照组相比,灌胃燕麦多糖后,正常小鼠的血清HDL-C含量显著升高,而糖尿病小鼠的HDL-C含量显著降低。综上可知,造成本研究HDL-C含量与申瑞玲^[32]和汪海波^[33]等研究结果不一致的原因可能以下几点:其一为实验材料不同,申瑞玲^[32]与汪海波^[33]等的实验材料为燕麦 β -葡聚糖,而本实验的实验材料为燕麦麸脂肪模拟物替代65%猪皮下脂肪制备成的发酵香肠;其二为燕麦 β -葡聚糖质量分数不同,申瑞玲等^[32]的实验中燕麦 β -葡聚糖质量分数为86%,汪海波等^[33]实验中的燕麦 β -葡聚糖质量分数为95%以上,而本次实验所饲喂的OBFS中燕麦 β -葡聚糖质量分数仅为13.95%;其三,研究对象不同,申瑞玲等^[32]是以实验性的高血脂大鼠为研究对象,汪海波等^[33]是以正常小鼠和糖尿病小鼠为研究对象,而本实验的研究对象为正常大鼠。而造成HDL-C含量下降的原因可能有两点:其一为饲喂饲料中的脂肪含量不同,实验组与对照组饲料中的脂肪含量分别为145、182.3 g/kg,高于基础组的96.9 g/kg;其二为脂肪种类不同,基础组中无动物脂肪,而实验组及对照组中添加20%的OBFS和20%的TFS,因而导致实验组与对照组中含有部分动物脂肪,可能导致HDL-C含量降低。但具体原因还有待进一步研究。

3.3 OBFS对大鼠抗氧化性能的影响

动脉粥样硬化是指由动脉壁增厚、变硬及弹性降低,并以动脉内膜形成粥样斑块为特征的病变,目前认为ox-LDL主要从内皮细胞损伤、促进泡沫细胞形成、促进血管平滑肌细胞增殖以及引起血小板黏附与聚集等方面参与动脉粥样硬化的形成。本研究结果显示,与基础相比,实验组的ox-LDL质量浓度无显著性差异 ($P>0.05$)。这可能与微生物发酵作用及燕麦麸的添加

有关。Xiong Mingmin等^[34]的研究结果表明, 经过微生物发酵后的脂肪不会导致ox-LDL质量浓度升高。李莺等^[35]研究结果表明, 燕麦酚类成分有显著抑制低密度脂蛋白的氧化和清除自由基的能力。MDA是脂质过氧化生成的一种醛基, 其在血液中的含量直接反应出氧化损伤的程度; 而SOD是天然抗氧化酶, 能够清除体内生成的氧自由基, 从而阻断脂质过氧化连锁反应, 其活性能够反应机体清除氧自由基的能力^[36]。本研究结果表明, 与基础组相比, 实验组、对照组大鼠血清中的MDA含量均无显著性差异 ($P>0.05$)。实验组大鼠血清中SOD水平在第9周时显著高于基础组、对照组 ($P<0.05$), 这与宁鸿珍^[37]和徐超^[38]等的研究结果一致。这可能是因为燕麦麸皮中含有的酚类、多糖类物质具有较强的抗氧化及清除自由基的能力。

4 结 论

实验组大鼠的采食量在第6、9周时显著低于基础组 ($P<0.05$), 说明OBFS具有抑制食欲的作用。实验组大鼠的体质量在第6、9周时与基础组无显著性差异, 在第9周时显著低于对照组 ($P<0.05$), 说明相比于TFS, OBFS具有控制体质量的作用。实验组大鼠的TC、TG、LDL-C含量在第0、3、6、9周与基础组无显著性差异, HDL-C含量在第6周显著低于基础组 ($P<0.05$); 与对照组相比, 实验组大鼠的TC、TG、LDL-C、HDL-C含量在第3、6、9周均偏低, 说明相比于TFS, OBFS具有促进血清中胆固醇及TG排除的能力, 但同时会导致HDL-C含量升高。实验组大鼠的SOD水平在第9周时显著高于基础组和对照组 ($P<0.05$), 说明OBFS具有清除自由基及氧化的能力。

参考文献:

- [1] 孔保华, 马丽珍. 肉品科学与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 287-311.
- [2] MUGUERZA E, GIMENO O, ANSORENA D, et al. New formulations for healthier dry fermented sausages: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(9): 452-457. DOI:10.1016/j.tifs.2003.12.010.
- [3] ARMSTRONG B, DOLL R. Environmental factors and cancer incidence and mortality in different countries, with special reference to dietary practices[J]. International Journal of Cancer, 1975, 15(4): 617-631. DOI:10.1002/ijc.2910150411.
- [4] OBA S, SHIMIZU N, NAGATA C, et al. The relationship between the consumption of meat, fat and coffee and the risk of colon cancer: a prospective study in Japan[J]. Cancer Letter, 2006, 244(2): 260-267. DOI:10.1016/j.canlet.2005.12.037.
- [5] CHOE J H, KIM H Y, LEE J M, et al. Quality of frankfurter-type sausages with added pig skin and wheat fiber mixture as fat replacers[J]. Meat Science, 2013, 93(4): 849-854. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.11.054.
- [6] FENG Tao, YE Ran, ZHUANG Haining, et al. Physicochemical properties and sensory evaluation of *Mesona Blumes* gum/rice starch mixed gels as fat-substitutes in Chinese Cantonese-style sausage[J]. Food Research International, 2013, 50(1): 85-93. DOI:10.1016/j.foodres.2012.10.005.
- [7] HICKS V, CHEN S C, TEPPER S A, et al. The cholesterol-lowering effect of oat bran cereals in rats-influence of processing[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 1995, 6(5): 246-249. DOI:10.1016/0955-2863(95)00021-Q.
- [8] 裴素萍, 蔡东联, 朱昱, 等. 燕麦 β -葡聚糖治疗大鼠高脂血症[J]. 第二军医大学学报, 2006, 27(5): 510-513. DOI:10.3321/j.issn:0258-879X.2006.05.012.
- [9] 帅瑾, 杨勇, 姚伟伟, 等. 四川发酵香肠中乳酸菌的分离与鉴定[J]. 食品工业科技, 2012, 33(20): 171-175.
- [10] 杨勇, 张雪梅, 程艳, 等. 四川香肠中产香葡萄球菌的分离与鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(6): 29-34.
- [11] 彭杰. 燕麦麸脂肪替代品的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 11-19.
- [12] RUIZ-CAPILLAS C, TRIKI M, HERRERO A M, et al. Konjac gel as pork backfat replacer in dry fermented sausages: processing and quality characteristics[J]. Meat Science, 2012, 92(2): 144-150. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.04.028.
- [13] 巩洋, 孙霞, 张林, 等. 混合菌种发酵生产低酸度川味香肠的加工工艺[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 227-232; 239. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.05.039.
- [14] 鱼达, 李辉, 姜骊. 实验动物随机分组的计算机程序处理[J]. 实验动物科学, 2011, 28(1): 25-27. DOI:10.3969/j.issn.1006-6179.2011.01.008.
- [15] 张培培. 燕麦 β -葡聚糖对大鼠肠道微环境和机体能量代谢的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 16-17.
- [16] VITAGLIONE P, LUMAGA R B, STANZIONE A, et al. β -Glucan-enriched bread reduces energy intake and modifies plasma ghrelin and peptide YY concentrations in the short term[J]. Appetite, 2009, 53(3): 338-344. DOI:10.1016/j.appet.2009.07.013.
- [17] BATTERHAM R L, COWLEY M A, SMALL C J, et al. Gut hormone PYY3-36 physiologically inhibits food intake[J]. Nature, 2002, 418: 650-654. DOI:10.1038/nature 00887.
- [18] BATTERHAM R L, COHEN M A, ELLIS S M, et al. Inhibition of food intake in obese subjects by peptide YY3-36[J]. New England Journal of Medicine, 2003, 349(10): 941-948. DOI:10.1056/NEJMoa030204.
- [19] 孙娟, 葛声, 张海峰, 等. 不同剂量燕麦 β -葡聚糖对大鼠体重及血脂的影响[J]. 医学研究杂志, 2016, 45(8): 66-70. DOI:10.11969/j.issn.1673-548X.2016.08.018.
- [20] 董吉林, 朱莹莹, 李林, 等. 燕麦膳食纤维对食源性肥胖小鼠降脂减肥作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(9): 24-29. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2015.09.005.
- [21] DUNAIF G, SCHNEEMAN B O. The effect of dietary fiber on human pancreatic enzyme activity *in vitro*[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34(6): 1034-1035.
- [22] AMINE E, BABA N, BELHADJ M, et al. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a joint WHO/FAO expert consultation[M]. Geneva: World Health Organization Press, 2002: 86-90.
- [23] STEIN O, WEINSTEIN D B, STEIN Y, et al. Binding, internalization, and degradation of low density lipoprotein by normal human fibroblasts and by fibroblasts from a case of homozygous familial hypercholesterolemia[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1976, 73(1): 14-18. DOI:10.1073/pnas.73.1.14.
- [24] JAHREIS G, VOGELSANG H, KIESSLING G, et al. Influence of probiotic sausage (*Lactobacillus paracasei*) on blood lipids and

- immunological parameters of healthy volunteers[J]. Food Research International, 2002, 35(2/3): 133-138. DOI:10.1016/S0963-9969(01)00174-0.
- [25] 张薇, 焦俊, 秦立强, 等. 燕麦膳食纤维对肠道胆固醇吸收的影响及机制研究[J]. 营养学报, 2016, 38(4): 345-350.
- [26] HUANG Ying, ZHENG Yongchen. The probiotic *Lactobacillus acidophilus* reduces cholesterol absorption through the down-regulation of Niemann-Pick C1-like 1 in Caco-2 cells[J]. British Journal of Nutrition, 2010, 103(4): 473-478. DOI:10.1017/S0007114509991991.
- [27] AI-SHERAJI S H, ISMAIL A, MANAP M Y, et al. Hypocholesterolaemic effect of yoghurt containing *Bifidobacterium pseudocatenulatum* G4 or *Bifidobacterium longum* BB536[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 356-361. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.04.120.
- [28] JEUN J, KIM S, CHO S, et al. Hypocholesterolemic effect of *Lactobacillus plantarum* KCTC3928 by increased bile acid excretion in C57BL/6 mice[J]. Nutrition, 2010, 26(3): 321-330. DOI:10.1016/j.nut.2009.04.011.
- [29] FUKUSHIMA M, NAKANO M. Effect of mixture of organisms, *Lactobacillus acidophilus* or *Streptococcus faecalis* on cholesterol metabolism in rats fed on a fat-and cholesterol-enriched diet[J]. British Journal of Nutrition, 1996, 76(6): 857-867. DOI:10.1079/BJN19960092.
- [30] GALLAHER D D, HASSEL C A, IEE K J. Relationships between viscosity of hydroxypropyl methylcellulose and plasma cholesterol in hamsters[J]. Nutrition, 1993, 123(10): 1731-1738.
- [31] ANSELL B J, WATSON K E, FOGELMAN A M, et al. High-density lipoprotein function recent advances[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2005, 46(10): 1792-1798. DOI:10.1016/S0164-1212(01)00082-6.
- [32] 申瑞玲, 王志瑞, 李宏全, 等. 燕麦 β -葡聚糖对高胆固醇血症大鼠血脂和生长的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(1): 44-48.
- [33] 汪海波, 刘大川, 崔邦梓, 等. 燕麦 β -葡聚糖对正常小鼠及四氧嘧啶致糖尿病小鼠血糖、血脂的调节作用研究[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 172-175. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2004.07.041.
- [34] XIONG Mingmin, ZHANG Yumei, LI Xiaobiao, et al. Effect of dietary Chinese cured meat on lipid metabolism in rats[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 60-67. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.07.048.
- [35] 李莺, 籍保平, 周峰, 等. 燕麦提取物清除自由基及抑制低密度脂蛋白氧化能力研究[J]. 食品科学, 2008, 29(6): 75-78. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.06.010.
- [36] 江承平, 刘福, 李毅, 等. 参附注射液对脑缺血再灌注大鼠MDA、SOD、TXB₂及6-keto-PGF₁ α 的影响及意义[J]. 中国医科大学学报, 2012, 41(2): 124-127. DOI:10.3969/j.issn.0258-4646.2012.02.008.
- [37] 宁鸿珍, 齐啸, 贾春媚, 等. 燕麦 β -葡聚糖抗氧化及降血脂作用的研究[J]. 食品科技, 2008, 33(9): 153-155. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2008.09.043.
- [38] 徐超. 燕麦 β -葡聚糖的体内代谢和抗运动疲劳作用机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 67-69.