

降胆固醇植物乳杆菌在酸豆奶中的应用

刘香英,范杰英,孟悦,曾宪鹏,南喜平,杨志强,康立宁*,孙洪蕊*
(吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心),吉林 长春 130033)

摘要: 由于降胆固醇植物乳杆菌 S2-5 和 K25 具有良好的功能特性,为更好地发挥其益生作用,将植物乳杆菌 S2-5 和 K25 分别与商品发酵剂进行复配发酵酸豆奶,对酸豆奶样品的感官品质、21 d 货架期内的微生物含量、理化指标变化以及降胆固醇功能进行测定。结果表明:添加植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的酸豆奶未产生不良风味,其口感更加绵滑、均匀,香气更加浓郁;植物乳杆菌 S2-5 和 K25 在酸豆奶冷藏期间具有较强的存活能力;含植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的酸豆奶灌胃高脂小鼠后,其血清动脉粥样硬化指数、总胆固醇以及低密度脂蛋白胆固醇的水平显著降低,血清高密度脂蛋白胆固醇的水平显著升高。益生性植物乳杆菌 S2-5 和 K25 发酵的酸豆奶质量优良且具有良好的降胆固醇功效。

关键词: 酸豆奶;植物乳杆菌 S2-5;植物乳杆菌 K25;降胆固醇;益生菌

Application of Cholesterol-Reducing *Lactobacillus plantarum* in Soybean Yoghurt

LIU Xiangying, FAN Jieying, MENG Yue, ZENG Xianpeng, NAN Xiping, YANG Zhiqiang,
KANG Lining*, SUN Hongrui*

(Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Innovation Center of Agricultural Science and Technology of China), Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: Cholesterol-reducing *Lactobacillus plantarum* S2-5 and *Lactobacillus plantarum* K25 has good functional properties. To better exert its prebiotic effect, S2-5 and K25 were respectively mixed with commercial starter to soybean yoghurt. The sensory properties, microbial content, physicochemical indexes and cholesterol-lowering function of soybean yoghurt fermented by S2-5 and K25 were determined. The results showed that the soybean yoghurt with *Lactobacillus plantarum* S2-5 and K25 addition did not produce undesirable flavor, and its taste was more delicate, smooth, uniform, and fragrant; *Lactobacillus plantarum* S2-5 and K25 had strong survival ability during the cold storage of soybean yoghurt samples; soybean yoghurt containing *Lactobacillus plantarum* S2-5 and K25 could significantly reduce serum atherosclerotic index (AI), total cholesterol (TC), low density lipoprotein-cholesterol (LDL-C) and significantly increased serum high density lipoprotein-cholesterol (HDL-C) after being intragastrically administered to hyperlipidemic mice. Conclusion: soybean yoghurt fermented by probiotic *Lactobacillus plantarum* S2-5 and K25 has good quality and cholesterol-lowering effect.

Key words: soybean yoghurt; *Lactobacillus plantarum* S2-5; *Lactobacillus plantarum* K25; cholesterol-lowering effect; probiotics

引文格式:

刘香英,范杰英,孟悦,等.降胆固醇植物乳杆菌在酸豆奶中的应用[J].食品研究与开发,2025,46(5):132-137.

LIU Xiangying, FAN Jieying, MENG Yue, et al. Application of Cholesterol-Reducing *Lactobacillus plantarum* in Soybean Yoghurt[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 132-137.

酸豆奶是以豆浆为主要原料,再配以适当的辅料,经乳酸菌发酵而成的活性乳酸菌饮品。因其具有提高

免疫力^[1-2]、抗癌^[3-5]、降低血清胆固醇^[6-8]、抗动脉粥样硬化^[9]和抗衰老等功能特性以及独特的口感风味和较高

基金项目:吉林省农业科技创新工程项目(CXGC2021ZYD112);吉林省科技发展计划项目(20210202106NC)

作者简介:刘香英(1981—),女(汉),副研究员,硕士,主要从事粮油加工方面的研究。

*通信作者:康立宁(1973—),男(汉),研究员,博士;孙洪蕊(1989—),女(汉),助理研究员,硕士。

的营养保健功能逐渐被大众所关注和喜爱^[10]。

乳酸菌为人体益生菌,近年来,利用乳酸菌发酵生产的产品(奶酪、酸奶、酸豆奶、植物乳酸菌饮料等),都因为具有一定的保健功能而受到越来越多的消费者的关注与青睐。研究表明,坚持食用乳酸菌类制品能够抑制致病菌的生长繁殖从而激活肠黏膜免疫系统^[9,11];增强新一代的调节T细胞^[12];通过激活单核巨噬细胞发挥抗癌作用^[13-14];降低胆固醇含量^[15-17];改善肝脂肪堆积^[18];降低心血管疾病的发生^[19]等。因此,将乳酸菌作为辅助发酵剂以增加发酵制品的保健功能已成为业内争先恐后研发的热点。

植物乳杆菌 S2-5 和 K25 是吉林省农业科学院农产品加工研究所从酸菜和西藏灵菇中自主分离得到的菌株,经鉴定具有较好的降胆固醇功能^[20-22],但目前还未在酸豆奶的发酵过程中应用,因此本研究的目的在于将这两株具有较好的降胆固醇功能的益生菌作为辅助发酵剂,与商品发酵剂复配后发酵酸豆奶,并对酸豆奶产品的品质进行分析评价,同时,用酸豆奶产品对高脂小鼠进行灌胃,研究植物乳杆菌 S2-5 和 K25 发酵的酸豆奶对小鼠血清胆固醇水平的影响,以期为开发具有降胆固醇功能的酸豆奶产品提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

植物乳杆菌 K25:吉林省农业科学院农产品加工研究所从西藏灵菇中分离得到;植物乳杆菌 S2-5:由吉林省农业科学院农产品加工研究所从酸菜中分离得到;菌株均保存在 MRS 培养基中,-80℃冻存于吉林省农业科学院;培养基按照文献^[23-24]中的方法配制。

大豆、奶粉、白砂糖:市售;商品发酵剂、嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌:科汉森(北京)贸易有限公司;高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein-cholesterol, HDL-C)测定试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein-cholesterol, LDL-C)测定试剂盒、总胆固醇(total cholesterol, TC)测定试剂盒、甘油三酯(triglyceride, TG)测定试剂盒:上海江莱生物科技有限公司。健康雄性 ICR 小鼠(60只,6周龄,体质量 17~20g)、常规饲料、高脂饲料:长春亿斯实验器材有限公司。

1.2 仪器与设备

P132 型豆浆机:九阳股份有限公司;HR-25D 型高剪切分散乳化机:上海沪析实业有限公司;MP2002 型天平:赛多利斯(上海)贸易有限公司;TA-XT Plus 型物性测试仪:英国 Stable Micro Systems 公司;FB20 型台式精密酸度计:奥豪斯仪器(常州)有限公司;D-8pc 型紫外-可见分光光度计:南京菲勒仪器有限公司;DH3600A 型恒温培养箱:河南沃林仪器设备有限公司;HH-4S 型数显恒温水浴锅:上海一恒实验仪器有限

公司;DHG-9140A 型电热鼓风干燥箱:上海习仁科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 酸豆奶样品的制备

挑选品质良好的大豆,开水漂烫 10 min,在 20℃条件下按料水质量比 1:3 浸泡 12 h 左右;取一定量的湿豆,加适量水,用豆浆机磨浆;白砂糖添加量为 8%,搅拌均匀后的豆浆与 10% 的奶液按 9:1 的质量比混合均匀;均质过滤后 95℃杀菌 15 min;速冷至 43℃左右,接种;分装压膜后 42.5℃发酵 10 h;后停止发酵;冷却至 10℃左右放入冰箱,4℃放置 1 d,进行发酵后熟。接种方案如表 1 所示。

表 1 接种方案

Table 1 Inoculation condition

样品	发酵剂	商品发酵剂添加量/%	植物乳杆菌 K25 添加量/%	植物乳杆菌 S2-5 添加量/%
1	商品发酵剂	0.006	0	0
2	商品发酵剂+植物乳杆菌 K25	0.006	0.006	0
3	商品发酵剂+植物乳杆菌 S2-5	0.006	0	0.006

1.3.2 酸豆奶样品的感官、理化以及微生物指标测定

1.3.2.1 酸豆奶样品感官评价

酸豆奶样品冷藏 1 d 后进行评定。组建一个 10 人感官评定小组,经过专业系统的培训后对酸豆奶样品分别从组织状态、风味、口感、色泽和黏稠度 5 个方面进行评定。评分标准如表 2 所示。

表 2 酸豆奶样品感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation standard of soy yogurt

项目	评分标准(满分 100)		
色泽	黄色 (0~<10)	淡黄 (10~<15)	微黄 (15~20)
组织状态	表面不光滑,切面粗糙 (0~<14)	表面光滑度一般,有轻微裂痕,切面状态均一 (14~<17)	表面光滑无裂痕,切面光滑 (17~20)
风味	有异味 (0~<14)	微微豆香味 (14~<17)	浓郁豆香味 (17~20)
口感	口感欠佳,太甜或太酸 (0~<14)	口感协调,偏甜或偏酸 (14~<17)	口感细腻,酸甜适口,柔和爽口 (17~20)
黏稠度	较稀 (0~<10)	一般 (10~<15)	较强 (15~20)

1.3.2.2 酸豆奶贮存期的理化和微生物指标测定

酸豆奶在 4℃条件下储存 21 d,每隔 3 d 取样测定 pH 值和滴定酸度,每隔 7 d 取样测定活菌数。

滴定酸度测定参照 GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》的方法。微生物指标采用

涂布平板计数法进行测定^[25], 酸豆奶样品稀释后, 分别涂布于各选择培养基进行培养并记录各菌株的活菌数。

1.3.3 酸豆奶样品降胆固醇功能测定

1.3.3.1 小鼠分组及饲养方案

小鼠随机分为4组, 每组15只。1组作为空白对照组, 小鼠给予维持饲料; 2~4组作为高脂模型组, 小鼠给予高脂饲料。每周称量体质量1次, 并在饲养14 d后采血, 检验是否形成高血脂模型^[26]。

高脂模型组给予高脂饲料4周, 根据小鼠体质量及外观状况选择体质量增加状态良好的小鼠, 模型组按体质量平均分为3组, 每组10只, 各组之间体质量无显著性差异($P>0.05$)。

小鼠饲养期间, 保证充足的水和饲料, 并于每天上午进行灌胃。小鼠取血前可给水但需禁食12 h。

1.3.3.2 生化指标测定

小鼠眼球取血, 37℃下孵育1 h, 冰箱冷藏室静置3 h后离心(3 000 r/min, 4℃, 10 min)获得血清, 所得血清于-20℃保存, 备用。取血清, 根据相关试剂盒的方法测定血清TC、TG、HDL-C、LDL-C含量, 并计算动脉粥样硬化指数(atherosclerotic index, AI), 公式如下。

$$A = \frac{C - C_1}{C_1}$$

式中: A为动脉粥样硬化指数; C为总胆固醇的浓度, mg/100 mL; C_1 为高密度脂蛋白的浓度, mg/100 mL。

1.4 数据处理与统计分析

所有实验均重复进行3次, 数据以平均值±标准差表示。使用SPSS和Duncan方法, 对数据进行方差分析和多重测试分析。在 $P<0.05$ 时表示处理的结果存在显著性差异。采用Origin 9.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 植物乳杆菌 S2-5 和植物乳杆菌 K25 在酸豆奶中的应用

2.1.1 感官评价

酸豆奶样品的感官评价综合得分见表3。

表3 酸豆奶样品的感官评价综合得分

Table 3 The comprehensive score of soy yoghurt in sensory evaluation

感官指标	商品发酵剂 酸豆奶对 照组	商品发酵剂+植 物乳杆菌 K25 的酸豆奶样品组	商品发酵剂+植 物乳杆菌 S2-5 的酸豆奶样品组
风味	17.35±2.17	19.17±3.24	18.41±2.56
口感	18.30±4.21	19.23±3.71	19.67±2.87
组织状态	18.56±1.59	18.88±2.11	19.47±2.03
色泽	19.72±2.33	20.26±2.51	20.81±2.42
黏稠度	18.43±3.11	20.16±3.62	20.55±3.40

由表3可知, 添加了植物乳杆菌 K25 和植物乳杆菌 S2-5 的酸豆奶样品未产生不良风味, 其口感更加绵滑、细腻, 且因菌株的相互协同作用而使香气更加浓郁。

2.1.2 冷藏期间酸豆奶的活菌数变化情况

4℃冷藏期间酸豆奶的活菌数变化见表4。

表4 4℃冷藏期间酸豆奶的活菌数变化

Table 4 Changes of viable bacteria count in soy yoghurt during cold storage at 4℃

组别(发酵菌株)	活菌数/[lg(cfu/mL)]			
	1 d	7 d	14 d	21 d
对照组 (嗜热链球菌)	9.01±0.03	9.21±0.15	9.12±0.07	8.90±0.03
对照组 (保加利亚乳杆菌)	7.03±0.02	7.94±0.06	7.60±0.14	7.02±0.04
试验组 1 (嗜热链球菌)	9.04±0.10	9.55±0.12	9.36±0.06	8.83±0.10
试验组 1 (保加利亚乳杆菌)	6.81±0.11	7.46±0.12	7.38±0.07	6.96±0.19
试验组 1 (植物乳杆菌 K25)	7.49±0.02	7.70±0.03	8.18±0.05	7.49±0.10
试验组 2 (嗜热链球菌)	9.09±0.07	9.43±0.10	9.26±0.07	8.80±0.11
试验组 2 (保加利亚乳杆菌)	6.84±0.12	7.55±0.08	7.32±0.06	7.09±0.11
试验组 2 (植物乳杆菌 S2-5)	7.31±0.01	7.61±0.03	8.04±0.06	7.33±0.09

由表4可知, 酸豆奶样品经4℃冷藏21 d后, 试验组中保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌的活菌数与对照组相比差异不明显, 表明植物乳杆菌 S2-5 及 K25 均不影响商业发酵剂的菌株生长。而且植物乳杆菌 S2-5 及 K25 的活菌数在14 d时达到最大, 分别为8.04 lg(cfu/mL)和8.18 lg(cfu/mL), 随后开始降低, 21 d时分别达到7.33 lg(cfu/mL)和7.49 lg(cfu/mL)。结果表明, 植物乳杆菌 S2-5 和 K25 在酸豆奶冷藏期间具有较强的存活能力。这与王辑^[27]和于志会^[21]的研究结果相一致。

2.1.3 酸豆奶冷藏期间滴定酸度与 pH 值的变化

酸豆奶冷藏期间滴定酸度与 pH 值的变化如图1和图2所示。

由图1和图2可知, 酸豆奶样品在4℃冷藏期间, 其滴定酸度随时间的延长呈上升趋势, pH值呈下降趋势。与对照组相比, 其他两组酸豆奶的滴定酸度均稍高于对照组, 但差异不明显。这是由于植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的产酸能力较差, 而且酸豆奶产品的发酵时间短, 导致植物乳杆菌 S2-5 和 K25 在发酵期间产生的乳酸未达到影响产品的酸度的水平, 所以差异不明显。

2.2 酸豆奶产品的降胆固醇功能鉴定

2.2.1 高脂血症小鼠模型的构建

高脂小鼠模型血脂的变化见表5。

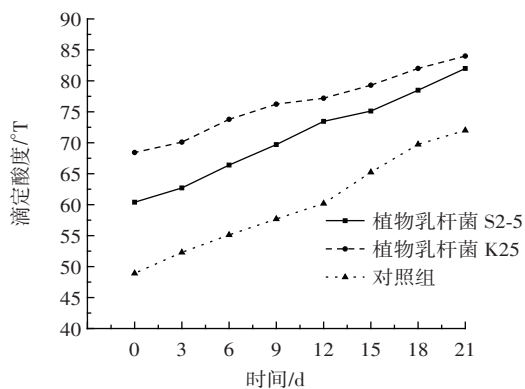


图1 酸豆奶冷藏期间滴定酸度变化

Fig.1 Changes of titration acidity during storage

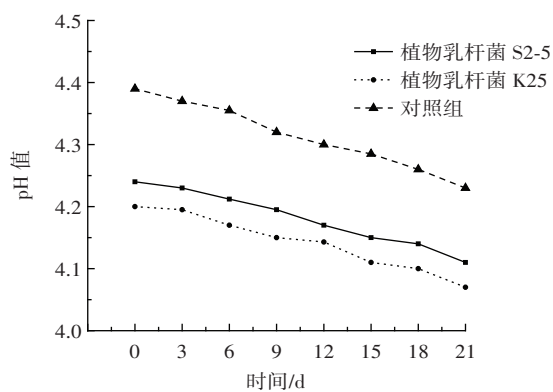


图2 酸豆奶冷藏期间 pH 值变化

Fig.2 Changes of pH values during storage

表6 饲喂高脂饲料小鼠血清 TC、TG、HDL-C 及 LDL-C 的含量

Table 6 Serum TC, TG, HDL-C and LDL-C levels in mice fed with high fat diet

组别	TC 含量/(mg/100 mL)	TG 含量/(mg/100 mL)	HDL-C 含量/(mg/100 mL)	LDL-C 含量/(mg/100 mL)	AI 值
1组(空白对照组)	124.26±33.13	63.40±23.88	65.21±14.75	82.65±20.36	0.69±0.04
2组(普通酸豆奶对照组)	124.65±17.67	72.26±21.90	79.48±26.91	77.73±26.12	0.45±0.03*
3组(添加 K25 的酸豆奶组)	89.01±22.61*	56.42±19.75	86.79±8.21*	53.65±16.85*	0.15±0.01**
4组(添加 S2-5 的酸豆奶组)	85.52±20.61*	55.21±20.01	85.90±9.85*	54.25±19.12*	0.18±0.01**

注:*表示与1组相比差异显著($P<0.05$);**表示与1组相比差异极显著($P<0.01$)。

量也减少,这与 Sui 等^[31]的研究结果基本一致。她们将植物乳杆菌 SM-7 发酵乳对高脂小鼠模型进行灌胃试验后的结果也表明,小鼠血清 TC 含量的减少与胆固醇的合成减少或代谢加速及与 LDL-C 的减少等有关。

此外,3组和4组小鼠血清中的 HDL-C 的含量相比1组显著升高($P<0.05$),2组与1组相比虽也有升高,但不显著。3组和4组小鼠血清中 TG 的含量与1组相比降低不显著。说明添加植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的酸豆奶可以使血清 HDL-C 的含量显著升高,而血清 TG 含量变化不明显。AI 值是反映心血管疾病易患程度的一个指标,AI 值越高,患心血管疾病的概率越高。HDL-C 对心血管有保护作用,通常称之为“好胆固

表5 高脂小鼠模型血脂的变化

Table 5 Changes of blood lipids in hyperlipidemic mouse models mg/100 mL

组别	TG	TC
正常组	71.66±7.83	110.62±12.11
高脂组	90.13±11.56*	130.28±15.32*

注:*表示差异显著, $P<0.05$ 。

如表5所示,经过14d的饲喂后,高脂小鼠组血清 TG 和 TC 含量与正常组相比均显著升高,说明高脂血症小鼠模型建立成功。

2.2.2 植物乳杆菌 S2-5 和 K25 对小鼠血清 TC、TG、HDL-C、LDL-C 含量及 AI 值的影响

饲喂高脂饲料后小鼠血清 TC、TG、HDL-C 及 LDL-C 的含量见表6。

如表6所示,与1组相比,3组和4组小鼠血清中 LDL-C 和 TC 的含量显著降低($P<0.05$),LDL-C 分别降低了35.08%和34.36%,TC 分别降低了28.37%和31.18%,AI 值分别降低了78.26%和73.92%,呈极显著降低($P<0.01$),而2组小鼠血清 LDL-C 和 TC 的含量降低不显著($P>0.05$)。结果表明添加了植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的酸豆奶可以使血清中的 LDL-C、TC 以及 AI 值的水平显著降低。这与 Zhu 等^[28]、Heo 等^[29]和 Deng 等^[30]的研究结果相一致。

在3组和4组小鼠血清中,LDL-C 和 TG、TC 的含量同时减少,说明 LDL-C 的生成量减少导致血清 TC 含

醇”,因为 HDL-C 可以将血液中多余的胆固醇转运回肝脏,并通过酯化作用使胆固醇更容易降解^[32]。本研究经植物乳杆菌 S2-5 和 K25 酸豆奶灌胃的小鼠的 AI 值与1组相比下降极显著,这可能是由于 HDL-C 水平的升高,导致胆固醇含量降低,从而可预防或改善动脉粥样硬化^[33]。

3 结论

本研究分别将西藏灵菇来源的益生性植物乳杆菌 K25 和酸菜来源的益生性植物乳杆菌 S2-5 作为辅助发酵剂,与商品发酵剂复配发酵酸豆奶,对酸豆奶产品的品质进行分析评价,结果表明:添加益生性植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的酸豆奶未产生不良风味,其口感更加

细腻、绵滑、黏稠、均匀,且香气更加浓郁;植物乳杆菌 S2-5 和 K25 在酸豆奶冷藏期间具有较强的存活能力;酸豆奶样品冷藏期间,其滴定酸度随着时间的延长呈上升趋势, pH 值呈下降趋势。

植物乳杆菌 S2-5 和 K25 发酵的酸豆奶对小鼠血清胆固醇的影响结果表明:与对照组相比,添加了植物乳杆菌 S2-5 和 K25 的酸豆奶致使血清中 HDL-C 的含量显著升高, LDL-C、TC 以及 AI 的水平显著地降低,而 TG 无显著变化。由此可以判断植物乳杆菌 S2-5 和 K25 发酵的酸豆奶均具有良好的降胆固醇功效。因此,利用植物乳杆菌 S2-5 和 K25 开发具有降胆固醇功能的酸豆奶产品将具有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] CHATTERJEE C, GLEDDIE S, XIAO C W. Soybean bioactive peptides and their functional properties[J]. *Nutrients*, 2018, 10(9): 1211.
- [2] 方磊,张瑞雪,魏颖. 发酵大豆蛋白肽增强小鼠机体免疫力及抗疲劳能力[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(12): 146-150.
FANG Lei, ZHANG Ruixue, WEI Ying. Fermented soybean protein peptide enhances immunity and anti-fatigue ability of mice[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(12): 146-150.
- [3] CHALAMAIAH M, YU W L, WU J P. Immunomodulatory and anti-cancer protein hydrolysates (peptides) from food proteins: A review[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 205-222.
- [4] GONZÁLEZ-MONTOYA M, HERNÁNDEZ-LEDESMA B, SILVÁN J M, et al. Peptides derived from *in vitro* gastrointestinal digestion of germinated soybean proteins inhibit human colon cancer cells proliferation and inflammation[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242: 75-82.
- [5] MAZEWSKI C, LIANG K T, GONZALEZ DE MEJIA E. Comparison of the effect of chemical composition of anthocyanin-rich plant extracts on colon cancer cell proliferation and their potential mechanism of action using *in vitro*, *in silico*, and biochemical assays[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242: 378-388.
- [6] BOACHIE R, YAO S X, UDENIGWE C C. Molecular mechanisms of cholesterol-lowering peptides derived from food proteins[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 20: 58-63.
- [7] AIELLO G, FERRUZZA S, RANALDI G, et al. Behavior of three hypocholesterolemic peptides from soy protein in an intestinal model based on differentiated Caco-2 cell[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 45: 363-370.
- [8] ZHANG H J, DUAN Y W, FENG Y L, et al. Transepithelial transport characteristics of the cholesterol-lowering soybean peptide, WGAPSL, in caco-2 cell monolayers[J]. *Molecules*, 2019, 24(15): 2843.
- [9] 史晓艳. 双歧杆菌对化疗后肠道菌群紊乱及相关性肠炎的防治[D]. 大连: 大连医科大学, 2017.
SHI Xiaoyan. Prevention and treatment of intestinal flora disorder and related enteritis by *Bifidobacterium* after chemotherapy[D]. Dalian: Dalian Medical University, 2017.
- [10] 丁玉萍,李春丰,孙睿. 添加不同辅料对发酵豆乳贮藏性的影响[J]. *食品工业科技*, 2005, 26(11): 103-104, 107.
DING Yuping, LI Chunfeng, SUN Rui. The influences of different ingredients on storage properties of fermented soybean milk[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2005, 26(11): 103-104, 107.
- [11] 谢秀明,热孜姑丽·库尔班,马彦科,等. 阿勒泰传统酸驼乳中乳酸菌发酵乳益生活性评价[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(8): 12-19, 24.
XIE Xiuming, RAZIGUL Kurban, MA Yanke, et al. *In vitro* hypoglycemic activity evaluation of lactic acid bacteria fermented milk from Altay traditional sour camel milk[J]. *China Dairy Industry*, 2023, 51(8): 12-19, 24.
- [12] KWON H K, LEE C G, SO J S, et al. Generation of regulatory dendritic cells and CD4⁺Foxp3⁺ T cells by probiotics administration suppresses immune disorders[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(5): 2159-2164.
- [13] SHARMA M, CHANDEL D, SHUKLA G. Antigenotoxicity and cytotoxic potentials of metabiotics extracted from isolated probiotic, *Lactobacillus rhamnosus* MD 14 on caco-2 and HT-29 human colon cancer cells[J]. *Nutrition and Cancer*, 2020, 72(1): 110-119.
- [14] 秦孟春,张玲芳,胡顺安,等. 乳酸菌胞外多糖抗肿瘤活性研究进展[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(9): 36-40.
QIN Mengchun, ZHANG Lingfang, HU Shun'an, et al. Research progress on antitumor activity of exopolysaccharides by lactic acid bacteria[J]. *China Dairy Industry*, 2023, 51(9): 36-40.
- [15] HATAKKA K, MUTANEN M, HOLMA R, et al. *Lactobacillus rhamnosus* LC705 together with *Propionibacterium freudenreichii* ssp shermanii JS administered in capsules is ineffective in lowering serum lipids[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2008, 27(4): 441-447.
- [16] ZHANG Y Y, TANG J Q, LI N, et al. Prenatal hypoxia induced ET_BR activation and abnormal ROS signalling in pulmonary artery cells of rat offspring[J]. *Reproductive Toxicology*, 2021, 105: 91-100.
- [17] KETNAWA S, OGAWA Y. Evaluation of protein digestibility of fermented soybeans and changes in biochemical characteristics of digested fractions[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 52: 640-647.
- [18] 张晓磊,武岩峰,朴春红,等. 益生菌发酵豆乳对高脂血症小鼠降血脂及肝损伤缓解的作用[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(5): 1-8.
ZHANG Xiaolei, WU Yanfeng, PIAO Chunhong, et al. Effects of probiotic-fermented soymilk on the hypolipidemic activity and on ameliorating liver injury in hyperlipidemic mice[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(5): 1-8.
- [19] 唐蓉,王康,郭元晟,等. 酵母菌与乳酸菌发酵马乳产 ACE 抑制肽[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 236-245.
TANG Rong, WANG Kang, GUO Yuansheng, et al. Optimized co-fermentation of horse milk by yeast and lactic acid bacteria to produce angiotensin-converting enzyme-inhibiting peptides[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 236-245.
- [20] 王辑,张雪,李达,等. 植物乳杆菌 K25 的技术特性[J]. *食品与生物技术学报*, 2012, 31(5): 518-524.
WANG Ji, ZHANG Xue, LI Da, et al. Technological properties of *Lactobacillus plantarum* K25[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2012, 31(5): 518-524.
- [21] 于志会. 益生性降胆固醇植物乳杆菌的筛选、发酵特性及体内功效研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 33-34.
YU Zhihui. Studies on screening, fermentation characteristics and *in vivo* efficacy of probiotic cholesterol-lowering *Lactobacillus plantarum*[D]. Changchun: Jilin University, 2013:33-34.
- [22] ZHANG L, ZHANG X, LIU C H, et al. Manufacture of Cheddar cheese using probiotic *Lactobacillus plantarum* K25 and its cholesterol-lowering effects in a mice model[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, 29(1): 127-135.

- [23] BUJALANCE C, JIMÉNEZ-VALERA M, MORENO E, et al. A selective differential medium for *Lactobacillus plantarum*[J]. Journal of Microbiological Methods, 2006, 66(3): 572-575.
- [24] DAVE R I, SHAH N P. Evaluation of media for selective enumeration of *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*, and bifidobacteria[J]. Journal of Dairy Science, 1996, 79(9): 1529-1536.
- [25] RAMCHANDRAN L, SHAH N P. Effect of exopolysaccharides on the proteolytic and angiotensin-I converting enzyme-inhibitory activities and textural and rheological properties of low-fat yogurt during refrigerated storage[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(3): 895-906.
- [26] ALKAN I, ALTUNKAYNAK B Z, GÜLTEKIN G İ, et al. Hippocampal neural cell loss in high-fat diet-induced obese rats-exploring the protein networks, ultrastructure, biochemical and bioinformatical markers[J]. Journal of Chemical Neuroanatomy, 2021, 114: 101947.
- [27] 王辑. 植物乳杆菌 K25 在发酵乳中的应用研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
WNAG Ji. Application of *Lactobacillus plantarum* K25 in fermented milk[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.
- [28] ZHU Y, LI T H, DIN A U, et al. Beneficial effects of *Enterococcus faecalis* in hypercholesterolemic mice on cholesterol transportation and gut microbiota[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(7): 3181-3191.
- [29] HEO W, LEE E S, CHO H T, et al. *Lactobacillus plantarum* LRCC 5273 isolated from Kimchi ameliorates diet-induced hypercholesterolemia in C57BL/6 mice[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2018, 82(11): 1964-1972.
- [30] DENG X L, MA J, SONG M T, et al. Effects of products designed to modulate the gut microbiota on hyperlipidaemia[J]. European Journal of Nutrition, 2019, 58(7): 2713-2729.
- [31] SUI Y, LIU J T, LIU Y X, et al. *In vitro* probiotic characterization of *Lactobacillus* strains from fermented tangerine vinegar and their cholesterol degradation activity[J]. Food Bioscience, 2021, 39: 100843.
- [32] RADER D J. High-density lipoproteins and atherosclerosis[J]. The American Journal of Cardiology, 2002, 90(8A): 62i-70i.
- [33] 冉冉, 王世平, 刘慧. 藏灵菇源酸奶复合菌发酵剂对大鼠降胆固醇的研究[J]. 营养学报, 2009, 31(1): 59-62.
RAN Ran, WANG Shiping, LIU Hui. Study on the cholesterol-reducing effects of complex bacteria leaven from kefir grain milk yoghurt in rats[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2009, 31(1): 59-62.

加工编辑:王雪

收稿日期:2023-11-20