

碳源对益生菌发酵黄浆水抗氧化和抑菌活性的影响

杜欣, 李理, 刘冬梅

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文研究了乳糖和蔗糖及其添加量对嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌发酵豆腐黄浆水产酸能力、抗氧化能力和抑菌能力的影响, 研究表明, 添加蔗糖能够提高乳酸菌的产酸能力, 其中添加 5% 的蔗糖发酵 24 h 时, 嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌发酵黄浆水的酸度值分别为 95.80 °T 和 93.68 °T; 添加蔗糖也可以增强嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌发酵黄浆水的抗氧化能力, 其中添加 5% 的蔗糖发酵 48 h 后效果最好, 还原力分别为 2.57 和 2.47 mM 生育酚/mL 样品、清除 ABTS 自由基分别为 37.69 和 37.98 mM 生育酚/mL 样品、螯合二价铁离子的能力分别为 75.69% 和 78.70%, 菌种之间没有显著性差异; 此外, 发酵 24 h 的黄浆水可以抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长, 但对蜡样芽孢杆菌没有抑制效果, 其中嗜酸乳杆菌发酵的黄浆水抑菌能力更强, 添加 1% 的蔗糖后发酵黄浆水的抑菌能力稍有增强。

关键词: 黄浆水; 鼠李糖乳杆菌; 嗜酸乳杆菌; 抗氧化活性, 抑菌作用

文章编号: 1673-9078(2014)2-129-133

Effect of Carbon Source on Antioxidant and Bacteriostatic Activities of Soybean Whey Fermented by Probiotic Bacterium

DU Xin, LI Li, LIU Dong-mei

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Lactose and sucrose were chosen as carbon source and added to tofu whey, after fermentation by *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus rhamnosus* respectively. The effect of different carbon sources and their additive amount on the produce of acid, the antioxidant and bacteriostatic activity of them were investigated. The results indicated that the addition of sucrose improved the production of acid in the fermentation process, and the titratable acidity of soybean whey with 5% sucrose fermented by *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus rhamnosus* for 24 h reached 95.80 °T and 93.68 °T, respectively. The addition of sucrose increased the antioxidant activities of fermented soybean whey. After fermentation of 48h by *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus rhamnosus* with the addition of 5% sucrose, the reducing power was 2.57 and 2.47 mM Trolox/mL fermented soybean whey, ABTS scavenging ability was 37.69 and 37.98 mM Trolox/mL fermented soybean whey, and chelating ferrous was 75.69% and 78.70%. Moreover, it showed inhibitory effect on the growth of *staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, but no inhibitory effect on *bacillus cereus*. After 24 h fermentation, the bacteriostatic activity of soybean whey fermented by *Lactobacillus acidophilus* was much stronger than that by *Lactobacillus rhamnosus*. And it was enhanced slightly by adding 1% sucrose.

Key words: soybean whey; *Lactobacillus rhamnosus*; *Lactobacillus acidophilus*; antioxidant activity; bacteriostatic activity

黄浆水是豆腐加工过程中产生的黄色沥水, 含有大量的低聚糖、蛋白质及异黄酮等营养成分, 如果直接排放会造成资源的浪费, 同时还因为其生物需氧量较高而严重污染环境。目前我国对于豆腐黄浆水的综合利用, 主要是将其作为发酵基质, 生产白地霉、维生素 B₂ 和 B₁₂, 此外黄浆水在存贮的过程中经过自然

收稿日期: 2013-09-25

基金项目: 广州市对外科技合作项目 (2013J4500021)

作者简介: 杜欣 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食, 油脂及植物蛋白

通讯作者: 李理 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向为蛋白质化学

发酵成为酸浆水, 是一种良好的豆腐凝固剂, 已在腐乳行业广泛应用。近年来, 随着豆制品在全球范围内消费量的增加, 对豆腐黄浆水的利用也引起了国外食品科学工作者的关注^[1]。

乳酸菌是很重要的一类益生菌, 具有调节肠道菌群平衡, 防治富贵病等多种生理功能, 应用于食品发酵工业时, 能够改善食品风味、提高食品抗氧化活性、抑制有害微生物及延长食物保质期等作用^[2]。近年来, 有报道表明, 应用乳酸菌发酵黄浆水还可以获得高密度的益生菌^[3]、降血压肽^[4]以及 γ -氨基丁酸^[5], 同时研究也发现, 自然发酵的酸浆水中含有大量的乳酸菌^[6]。

因此,采用乳酸菌发酵黄浆水,不仅可以获得功能性的食品成分,也可以获得生产性能优越、食用安全性良好的豆腐凝固剂。本课题组的前期研究表明,利用嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌发酵黄浆水,能够提高黄浆水的抗氧化活性,但是其产酸能力较弱^[7],考虑到添加蔗糖可以促进鼠李糖乳杆菌生长^[5],添加乳糖可以促进瑞士乳杆菌和干酪乳杆菌产酸^[8],本文进一步研究了这两种碳源对嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌在黄浆水中生长产酸、抗氧化及抗菌能力的影响,现将研究结果报导如下。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 实验菌株

鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus* 6013),嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus* 20272):购于中国工业微生物菌种保藏管理中心;

蜡样芽孢杆菌 CMCC(B)63302,金黄色葡萄球菌 ATCC6538,大肠杆菌 ATCC8739:购于广东省微生物研究所微生物菌种保藏中心。

1.1.2 培养基

MRS 培养基:蛋白胨 10 g,葡萄糖 20 g,酵母浸膏 5 g,乙酸钠 5 g,柠檬酸氢二铵 2 g,牛肉膏 10 g, Tween-80 1 mL, K_2HPO_4 2 g, $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ 0.25 g, $MgSO_4$ 0.25 g,蒸馏水 1000 mL, pH=7.2;

营养肉汤:牛肉膏 3 g, NaCl 5 g,蛋白胨 10 g,蒸馏水 1000 mL, pH=7.0。

1.1.3 原料与试剂

黄浆水:由广州市豆腐制造企业提供;
TPTZ, DPPH, ABTS, 菲洛嗪和生育酚(Trolox)购买于美国西格玛公司;其它试剂均为分析纯级别。

1.1.4 仪器

UV230 紫外分光光度计, JJ500 型电子天平, LDZX-30KBS 立式压力蒸汽灭菌器, SZX 超净工作台, PYX-190S-A 生化培养箱等。

1.2 实验方案

将分别添加 1%乳糖, 1%蔗糖, 5%蔗糖的黄浆水和黄浆水原液于 115 °C 条件下灭菌 10 min, 然后在无菌环境中分别接入活化好的鼠李糖乳杆菌 6013 和嗜酸乳杆菌 20272, 30 °C 恒温培养, 每隔 12 h 测定样品的 pH 和酸度值, 连续测定 60 h。并测定发酵时间为 0 h、24 h、48 h 样品的抗氧化活性以及发酵 48 样品的抑菌效果。

1.3 实验方法^[7]

1.3.1 pH 值和酸度值的测定

使样品恢复室温, 直接用 SevenEasy pH(S20) 计测定样品的 pH 值; 采用 GB/T5009.46-2010 方法测定酸度值, 用湿尔度 °T 表示。

1.3.2 体外抗氧化活力的测定

1.3.2.1 还原三价铁的能力(FRAP)测定

还原三价铁能力的测定方法参考 Benzie 和 Strain 建立的方法:用 40 mM 的 HCl 溶液配制浓度为 10 mM 的 TPTZ 溶液, 然后将 2.5 mL 的 TPTZ 溶液, 2.5 mL 的 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 溶液(20 mM)和 25 mL 的醋酸盐缓冲液(300 mM, pH 3.6)混合, 制备得到 FRAP 溶液。配制不同浓度的样品或者生育酚 100 μ L, 加入 3 mL 的 FRAP 溶液, 在 37 °C 下放置 10 min, 于 593 nm 处测定吸光值。通过标准曲线方程 $y=0.0014x+0.0353$, $r^2=0.994$ (y: 吸光值, x: 生育酚浓度 μ M), 将结果表示为 mM 生育酚/mL 样品。

1.3.2.2 清除 DPPH 和 ABTS⁺能力测定

清除 DPPH 自由基能力的测定方法参考 Brandwilliams 等建立的方法:配制不同浓度的样品或者生育酚 2 mL, 加入 2 mL 的 DPPH 乙醇溶液(0.2 mM), 振荡摇匀, 在室温下放置 30 min 后, 于 517 nm 处测定吸光值。通过标准曲线方程为 $y=-0.0162x+1.0339$, $r^2=0.999$ (y: 吸光值, x: 生育酚浓度 μ M), 将结果表示为 μ M 生育酚/mL 样品。

清除 ABTS⁺能力的测定方法参考 Re 建立的方法:配制含有 7 mM 的 ABTS 溶液和 2.45 mM 的过硫酸钾的 ABTS⁺溶液, 使用前在黑暗室温环境中放置 12~16 小时。用乙醇稀释 ABTS⁺溶液, 使其在 734 nm 处的吸光值为 0.70 ± 0.02 。配制不同浓度的样品或者生育酚 30 μ L, 加入 3 mL 稀释后的 ABTS⁺溶液, 在室温下反应 6 min, 于 734 nm 处测定吸光值。通过标准曲线方程 $y=-0.0003x+0.6995$, $r^2=0.997$ (y: 吸光值, x: 生育酚浓度 μ M), 将结果表示为 mM 生育酚/mL 样品。

1.3.2.3 螯合二价铁能力测定

螯合二价铁能力的测定方法参考 Dinis 等建立的方法:配制不同浓度的样品或者生育酚 3 mL, 加入 50 μ L 的 $FeCl_2$ 溶液(2 mM)和 100 μ L 的菲洛嗪溶液(5 mM), 混合均匀, 在室温下反应 20 min, 于 562 nm 波长测定吸光度值。螯合 Fe^{2+} 能力的计算公式如下:

$$\text{螯合 } Fe^{2+} \text{ 能力} / \% = [1 - (A_2 - A_1) / A_0] \times 100$$

注: A_0 为用水做空白对照的吸光值, A_1 为无菲洛嗪时样品的吸光值, A_2 为样品的吸光值。

1.3.3 抑菌实验

采用牛津杯抑菌圈法: 取 0.5 mL 浓度约为 10^7 的指示菌注入营养肉汤培养皿中, 涂布均匀, 然后将已灭菌的牛津杯放入培养皿中, 并向牛津杯中注入 0.25 mL 的发酵黄浆水, 37 °C 恒温培养 24 h, 测量抑菌圈直径。

1.3.4 数据处理与分析

采用 SPSS 17.0 和 Excel 2007 分析处理实验数据。所有试验都有三组平行样品, 实验数据表示为“平均值±标准偏差”的形式, 显著性差异通过一维方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多项极差检验法分析得

2 结果与分析

2.1 乳糖和蔗糖对发酵黄浆水酸度和 pH 的影响

乳酸菌代谢的糖类的种类和数量不同, 其产酸量也不同, 由于黄浆水中低聚糖含量较少, 不利于乳酸菌生长与产酸, 所以需要补充一定的碳源。从图 1 和图 2 可以看出, 分别添加 1% 的乳糖和蔗糖时, 蔗糖更有利于乳酸菌产酸和降低 pH 值; 当蔗糖的添加量为 5% 时, pH 值明显降低, 酸度值显著升高。陈则华^[3]通过试验也发现添加 5% 的蔗糖时, 黄浆水发酵液的活菌数达到最大。从实验结果还发现, 在发酵初期的 12 h 内, 乳酸菌处于对数生长期, 产酸迅速, pH 值下降迅速, 发酵 24 h 后, pH 值和产酸量达到最大, 其后趋于平稳。在黄浆水中, 嗜酸乳杆菌比鼠李糖乳杆菌的产酸能力稍强, 酸度值较高。

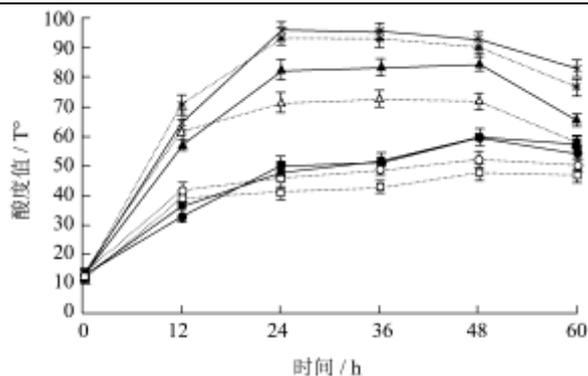


图 1 发酵黄浆水的酸度值

Fig.1 The titratable acidity of fermented soybean whey

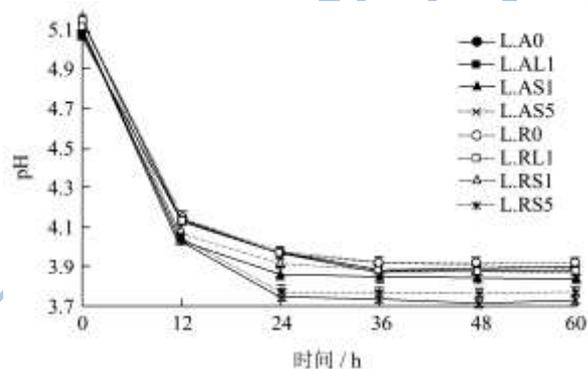


图 2 发酵黄浆水的 pH 值

Fig.2 The pH of fermented soybean whey

注: L.A0, L.AL1, L.As1, L.As5 分别表示嗜酸乳杆菌发酵的无糖, 添加 1% 乳糖, 1% 蔗糖, 5% 蔗糖的黄浆水; L.R0, L.RL1, L.Rs1, L.Rs5 分别表示鼠李糖乳杆菌发酵的无糖, 添加 1% 乳糖, 1% 蔗糖, 5% 蔗糖的黄浆水。

2.2 发酵黄浆水的抗氧化能力

2.2.1 还原三价铁的能力 (FRAP)

表 1 发酵黄浆水还原三价铁的能力 (mM 生育酚/mL 样品)

Table 1 The ferric reducing antioxidant power of fermented soybean whey (mM Trolox/mL sample)

样品	L.A			L.R		
	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
原液	1.83±0.07 ^{Aa}	1.98±0.01 ^{Ba}	2.14±0.03 ^{Ca}	1.83±0.07 ^{Aa}	1.92±0.05 ^{Ba}	2.08±0.01 ^{Ca}
1% 乳糖	1.90±0.03 ^{Ab}	2.09±0.02 ^{Bb}	2.14±0.03 ^{Ba}	1.90±0.03 ^{Ab}	2.07±0.03 ^{Bb}	2.10±0.02 ^{Ba}
1% 蔗糖	1.89±0.01 ^{Ab}	2.26±0.04 ^{Bc}	2.26±0.02 ^{Bb}	1.89±0.01 ^{Ab}	2.25±0.02 ^{Bc}	2.26±0.04 ^{Bb}
5% 蔗糖	1.98±0.02 ^{Ac}	2.48±0.02 ^{Cd}	2.57±0.05 ^{Dc}	1.98±0.02 ^{Ac}	2.34±0.04 ^{Bd}	2.47±0.02 ^{Cc}

注: L.A 和 L.R 分别表示嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌; 大小写字母分别标注同一行和同一列数据的显著性差异 ($p < 0.05$)。

物质的抗氧化活性和还原能力直接相关, 具有还原性质的化合物可以提供氢原子, 通过阻断自由基链式反应来发挥抗氧化作用, 因此还原力是评定抗氧化活性的重要指标^[4]。由表 3 的试验结果可以看出, 通过乳酸菌发酵可以显著增强黄浆水的还原力, 嗜酸乳杆菌的作用效果更明显, 而且随着发酵时间的延长, 其还原力明显增强。添加糖类能够增强发酵黄浆水的

还原力, 其中补充 5% 蔗糖的效果更显著。

2.2.2 清除 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的能力

2.2.2.1 清除 DPPH 自由基的能力

DPPH 带有一个额外的离域电子, 可以接受电子或者氢离子形成稳定的反磁性分子, 被广泛的用于评定抗氧化剂清除自由基的能力^[4]。由表 2 可以看出, 乳酸菌的发酵作用可以显著增强黄浆水清除 DPPH 自

由基的能力,而且延长发酵时间也可以增强其清除 DPPH 自由基的能力。但是碳源的种类和添加量对其清除 DPPH 能力的没有明显影响,而且不同菌种之间

也没有显著差异。试验结果表明发酵黄浆水中含有能够提供电子或者氢离子的物质,来清除 DPPH 自由基。

表 2 发酵黄浆水清除 DPPH 自由基能力 (uM 生育酚/mL 样品)

Table 2 The scavenging effect of fermented soybean whey on DPPH (uM Trolox/mL Sample)

样品	L.A			L.R		
	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
原液	23.97±0.15 ^{Ab}	25.69±0.52 ^{Ba}	28.98±0.06 ^{Ea}	23.97±0.15 ^{Ab}	26.90±0.19 ^{Cb}	29.00±0.04 ^{Eb}
1%乳糖	23.74±0.06 ^{Ab}	25.82±0.14 ^{Ba}	29.08±0.06 ^{Eb}	23.74±0.06 ^{Ab}	26.44±0.02 ^{Ca}	28.83±0.30 ^{Da}
1%蔗糖	23.39±0.06 ^{Ab}	26.66±0.11 ^{Bb}	29.25±0.09 ^{Db}	23.39±0.06 ^{Ab}	27.18±0.13 ^{Cc}	29.12±0.05 ^{Db}
5%蔗糖	22.74±0.03 ^{Aa}	27.21±0.06 ^{Bc}	29.60±0.03 ^{Dc}	22.74±0.03 ^{Aa}	27.28±0.03 ^{Bc}	29.64±0.05 ^{Dc}

注: L.A 和 L.R 分别表示嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌; 大小写字母分别标注同一行和同一列数据的显著性差异 (p<0.05)。

2.2.2.2 清除 ABTS⁺自由基的能力

表 3 发酵黄浆水的清除 ABTS 自由基能力 (mM 生育酚/mL 样品)

Table 3 The scavenging effect of fermented soybean whey on ABTS (mM Trolox/mL Sample)

样品	L.A			L.R		
	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
原液	29.80±0.39 ^{Aa}	30.76±0.53 ^{Aa}	34.09±0.79 ^{Ca}	29.80±0.39 ^{Aa}	30.02±0.17 ^{Aa}	32.87±0.53 ^{Ba}
1%乳糖	31.24±0.34 ^{Ab}	32.28±0.67 ^{Bb}	33.91±0.93 ^{Ca}	31.24±0.34 ^{Ab}	30.80±0.13 ^{Aa}	34.13±0.46 ^{Cb}
1%蔗糖	31.31±0.06 ^{Ab}	33.57±0.86 ^{Bc}	35.28±0.48 ^{Cb}	31.31±0.06 ^{Ab}	32.94±0.59 ^{Bb}	36.13±0.46 ^{Cc}
5%蔗糖	30.61±0.40 ^{Aa}	35.65±0.61 ^{Cd}	37.69±0.28 ^{Dc}	30.63±0.40 ^{Aa}	34.57±0.34 ^{Bc}	37.98±0.46 ^{Dd}

注: L.A 和 L.R 分别表示嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌; 大小写字母分别标注同一行和同一列数据的显著性差异 (p<0.05)。

从表 3 的试验结果可以看出,乳酸菌的发酵作用可以提高黄浆水清除 ABTS 自由基的能力,但不同菌种之间没有显著差异,延长发酵时间和添加糖类都能促进乳酸菌的发酵作用,提高发酵黄浆水清除 ABTS 自由基的能力,其中添加蔗糖的效果更加显著,而且随着蔗糖添加量的增大,清除 ABTS 自由基的能力增强。

Floegel 等^[5]曾应用 DPPH 和 ABTS 两种方法检测了美国 50 种常见的抗氧化剂的抗氧化活性,结果表明 ABTS 方法能更准确地反映有色素和水溶性的抗氧化剂的活性。从上述发酵黄浆水清除自由基的能力来看,ABTS 方法的检测结果能够体现出添加蔗糖后的活性变化。

2.2.3 螯合二价铁能力

表 4 发酵黄浆水螯合二价铁的能力 (%)

Table 4 The chelating effect of fermented soybean whey on ferrous

样品	L.A			L.R		
	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
原液	18.84±0.53 ^{Aa}	56.39±0.54 ^{Ca}	62.29±1.09 ^{Da}	18.84±0.53 ^{Aa}	56.31±0.47 ^{Ca}	62.41±0.38 ^{Da}
1%乳糖	20.09±0.24 ^{Aa}	57.87±0.55 ^{Ba}	63.19±0.54 ^{Cb}	20.09±0.24 ^{Aa}	58.26±0.82 ^{Ba}	66.32±0.75 ^{Cb}
1%蔗糖	20.12±0.31 ^{Aa}	64.52±0.30 ^{Cb}	69.44±0.88 ^{Dc}	20.52±0.31 ^{Aa}	61.20±5.89 ^{Bb}	69.98±2.46 ^{Dc}
5%蔗糖	20.32±0.36 ^{Aa}	67.06±0.77 ^{Bc}	75.69±1.11 ^{Cd}	20.32±0.36 ^{Aa}	78.23±1.17 ^{Cc}	78.70±1.09 ^{Cd}

注: L.A 和 L.R 分别表示嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌; 大小写字母分别标注同一行和同一列数据的显著性差异 (p<0.05)。

一些重要的氧化反应(例如芬顿反应),需要 Fe²⁺ 的参与才能产生羟自由基。而螯合剂通过移除 Fe²⁺ 来阻止反应的进行,抑制活性氧基团的产生和脂质过氧化作用,进而减弱氧化损伤,发挥重要的抗氧化效应^[4]。由表 4 可以看出,通过乳酸菌发酵,可以显著提高黄浆水螯合二价铁的能力,而且随着发酵时间的延长,效果更加显著。碳源的添加对其螯合二价铁的能

力也有一定的影响,其中添加蔗糖比乳糖的效果显著,而且增大蔗糖的添加量有利于螯合能力的增强,但是菌种之间没有显著性差异。

对于多数生物样品来说,抗氧化效应是多种具有抗氧化活性的物质通过不同机制(如还原氧化物,清除自由基,螯合过渡金属催化剂,阻止氢原子的传递和链式反应的发生等)协同作用的结果,而不是单一

化合物通过单一机制实现的^[10]。研究表明,经过乳酸菌的发酵作用,黄浆水具有较强的抗氧化活性这可能与发酵黄浆水中有蛋白水解物、异黄酮、多糖以及乳酸菌及其代谢物有关。一方面乳酸菌有蛋白水解活性,能够分解黄浆水中的蛋白产生有抗氧化活性的多肽,如 Abubakr 等^[11]应用乳酸菌发酵脱脂奶粉,分解得到的多肽能够很好地清除 DPPH 自由基和螯合二价铁。另一方面乳酸菌可以产生 β -葡萄糖苷酶,将糖苷结合型异黄酮转化成抗氧化活性更高的配基型异黄酮(黄豆苷元和染料木黄酮),如 Marazza 等^[12]利用鼠李糖乳杆菌发酵豆奶,发酵后的酸豆奶中配基型异黄酮的含量增高,抗氧化活性增强。此外,研究还证明大豆多糖片段^[13]、乳酸菌及其代谢产物也具有抗氧化活性。

总之,从实验结果可以看出添加蔗糖可以提高发酵黄浆水还原三价铁的能力、清除 ABTS 的能力以及螯合二价铁的能力,添加 5% 的蔗糖效果更好,但菌种之间没有显著性差异,这可能是因为蔗糖的添加促进了乳酸菌的生长以及代谢活力,导致蛋白水解酶和 β -葡萄糖苷酶的活力增强,同时也产生更多的胞外代谢物和细胞自溶,所有上述物质的产生和增加均能不同程度地增强发酵黄浆水的抗氧化能力

2.3 发酵黄浆水的抑菌效果

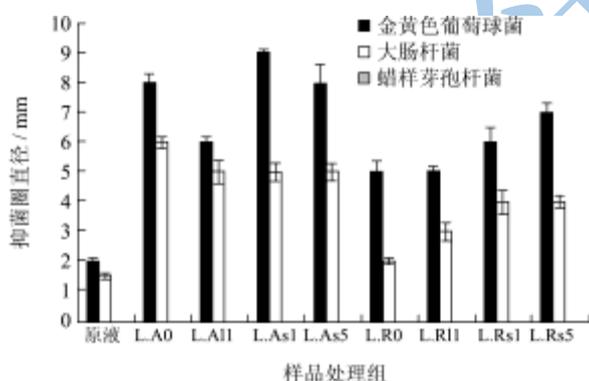


图 3 发酵黄浆水的抑菌效果

Fig.3 The bacteriostatic activities of fermented soybean whey

注: LA0、LA11、LAs1、LAs5 分别表示嗜酸乳杆菌发酵的无糖、添加 1% 乳糖、1% 蔗糖、5% 蔗糖的黄浆水; LR0、LR11、LRs1、LRs5 分别表示鼠李糖乳杆菌发酵的无糖,添加 1% 乳糖、1% 蔗糖、5% 蔗糖的黄浆水。

从图 3 可以看出,经过乳酸菌的发酵作用,黄浆水对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制效果显著增强,对金黄色葡萄球菌的抑制效果最好,但对蜡样芽孢杆菌几乎没有抑制作用。发酵黄浆水的抑菌作用可能来源于两方面,一方面乳酸菌代谢产生的酸性物质、细菌素、二氧化碳和过氧化氢等有广泛的抑菌作用,

其中酸性物质可以消耗大量细胞能量并影响细胞膜的稳定性,细菌素可以作用于细胞,造成膜内物质和能量的泄漏;另一方面异黄酮及其代谢产物同时也具有不同程度的抑菌效果,其中对金黄色葡萄球菌有比较明显的抑制作用^[14]。

从图 3 还可以看到,发酵黄浆水的抑菌能力与菌种有关,由嗜酸乳杆菌发酵的黄浆水其抑菌能力更强,添加蔗糖后发酵的黄浆水抑菌能力稍有增强,但与产酸能力和抗氧化能力没有正相关,这可能与菌种产生细菌素的能力有关。因此,在制备酸浆豆腐凝固剂时可以选择嗜酸乳杆菌来发酵添加了 1% 蔗糖的黄浆水,由此可以获得酸度高、凝乳能力强、有一定抗氧能力和抗菌活性的酸浆水。但值得注意的是,发酵黄浆水对蜡样芽孢杆菌没有任何抑制效果,实际应用时需要采取其它措施加以防范。

3 结论

黄浆水中含有多糖、蛋白质、异黄酮和其他营养素,乳酸菌可以在黄浆水中生长产酸,其发酵液有较强的抗氧化活性,而且随着发酵时间的延长能够增强黄浆水的抗氧化活性。向黄浆水中补充蔗糖作为碳源,有利于乳酸菌产酸,降低 pH 值,其中添加 5% 蔗糖的效果最佳,同时也可以提高黄浆水的抗氧化活性。此外研究还发现发酵后的黄浆水可以抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长,但对蜡样芽孢杆菌没有抑制效果。黄浆水是豆腐制造业的工业废水,产量很大,由于其营养成分丰富而且含量较高,直接排放造成了资源的极大浪费。本研究为黄浆水的应用提供了依据。

参考文献

- [1] Belén F, Sánchez J, Hernández E, et al. One option for the management of wastewater from tofu production: Freeze concentration in a falling-film system [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110: 364-373
- [2] Rhee S J, Lee J E, Lee C H. Importance of lactic acid bacteria in Asian fermented foods [J]. Microbial Cell Fact, 2011, 10(1): S5
- [3] 陈则华,李理.利用大豆黄浆水的发酵研究[J].食品研究与开发,2007,28(3):42-46
- [4] Fung W, Liong M. Evaluation of proteolytic and ACE-inhibitory activity of *Lactobacillus acidophilus* in soy whey growth medium via response surface methodology [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43:563-567
- [5] 姚子鹏,吴非.乳酸菌发酵黄浆水富集 GABA 的研究[J].食品科技,2013,38(4):7-16

- [6] Qiao Z, Chen X, Chen Y. Microbiological and chemical changes during the production of acidic whey, a traditional chinese tofu-coagulant [J]. International Journal of Food Properties, 2010, 13(1): 90-104
- [7] 杜欣,李理.乳酸菌发酵黄浆水的抗氧化研究[J].中国酿造, 2013,32(7):24-27
- [8] 王浩,李理.牛奶组分对酸豆乳风味的影响[J].中国乳品工业,2011,39(3):34-37
- [9] Zhang Z, Lv G, Pan H, et al, Antioxidant and hepatoprotective potential of endo-polysaccharides from *Hericium erinaceus* grown on tofu whey [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51: 1140-1146
- [10] Floegel A, Kim D O, Chung S J, et al, Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods [J]. Journal of food composition and analysis, 2011, 24(7): 1043-1048
- [11] Abubakr M A, Hassan Z, Imdakim M M, et al. Antioxidant activity of lactic acid bacteria (LAB) fermented skim milk as determined by 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and ferrous chelating activity (FCA) [J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(34): 6358-6364
- [12] Marazza J A, Nazareno M A, Giori de G S, et al., Enhancement of the antioxidant capacity of soymilk by fermentation with *Lactobacillus rhamnosus* [J]. Journal of Functional Foods, 2012, 4(3): 594-601
- [13] Mateos-Aparicio I, Mateos-Peinado C, Jimenez-Escrig A, et al. Multifunctional antioxidant activity of polysaccharide fractions from the soybean byproduct okara [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 245-250
- [14] Wang Q, Wang H, Xie M. Antibacterial mechanism of soybean isoflavone on *Staphylococcus aureus* [J]. Archives of microbiology, 2010, 192(11): 893-898