改性燕麦麸水溶性膳食纤维对发酵乳品质及抗氧化活性的影响

吴丽萍[1]，孙 虹[1]，董康珍[1]，楚文靖[1]，胡晓倩*[1]，李宏宇[2]
（1. 黄山学院 生命与环境科学学院，安徽 黄山 245041；2. 嘉吉公司，上海 200233）

摘要：将微波改性制备、具有良好理化特性的燕麦麸水溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber，SDF)添加到发酵乳中，研究改性燕麦麸 SDF 对发酵乳乳酸菌活菌数、稳定性、pH 及酸度、凝乳时间、质构特性、感官品质、储能模量和损失模量、抗氧化活性的影响。结果表明：添加质量分数 4%的改性燕麦麸 SDF 可显著提高发酵乳中乳酸菌活菌数，改善质构特性(P<0.05)，有助于形成凝胶网状结构，缩短了凝乳时间，但过量添加会影响发酵乳的口感及稳定性。当改性燕麦麸 SDF 的添加质量分数为 4%时，发酵乳的持水力最高达到 94.82%，硬度、黏性、胶着性、弹性、内聚性最佳。发酵乳对 DPPH 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基的清除能力随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加而不断增强，清除率最高可分别达到 39.97%、62.30%、75.51%，显著高于空白对照组(P<0.05)。改性燕麦麸 SDF 可显著改善发酵乳的品质及抗氧化活性，本研究结果可为燕麦麸 SDF 的应用及功能性发酵乳的开发提供理论依据。

关键词：改性；燕麦麸水溶性膳食纤维；发酵乳；品质；抗氧化活性
中图分类号：TS 252.54　**文章编号：**1673-1689(2021)09-0040-10　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.09.006

Effects of Modified Oat Bran Soluble Dietary Fiber on Quality and Antioxidant Activity of Fermented Milk

WU Liping[1]，*SUN Hong*[1]，*DONG Kangzhen*[1]，*CHU Wenjing*[1]，*HU Xiaoqian**[1]，*LI Hongyu*[2]
(1. College of Life and Environmental Sciences, Huangshan University, Huangshan 245041, China; 2. Cargill Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The soluble dietary fiber (SDF) of oat bran with good physical and chemical properties prepared by microwave modification was added to fermented milk to study the effects of modified oat bran SDF on the number and stability of live lactic acid bacteria, pH value and acidity, coagulation time, texture, sensory quality, storage modulus, loss modulus and antioxidant activity of fermented milk. The results indicated that 4% addition of modified oat bran SDF could significantly increase the number of living lactic acid bacteria in fermented milk, improve the texture properties (P<0.05), favor the formation of gel network structure and shorten the coagulation time, however,

收稿日期：2020-09-28
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(32001760)；安徽省高校自然科学研究项目(KJHS2015B12)；国家级大学生创新训练项目(202010375012)。
作者简介：吴丽萍(1982—)，女，硕士，讲师，主要从事功能性食品研究。E-mail：wlp@hsu.edu.cn
* **通信作者：**胡晓倩(1972—)，女，硕士，教授，硕士研究生导师，主要从事天然产物研究。E-mail：hxq@hsu.edu.cn

excessive addition would affect the taste and stability of fermented milk. When the addition of modified oat bran SDF was 4%, the highest water holding capacity of fermented milk was up to 94.82%, and the hardness, viscosity, adhesiveness, elasticity and cohesion were the best. The scavenging ability of fermented milk to DPPH radical, hydroxyl radical and superoxide anion radical increased with the increase of modified oat bran SDF, and reached as high as 39.97%, 62.30% and 75.51%, respectively, significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$). Modified oat bran SDF could significantly improve the quality and antioxidant activity of fermented milk. This study may provide a theoretical basis for the application of oat bran SDF and the development of functional fermented milk.

Keywords: modification, oat bran soluble dietary fiber, fermented milk, quality, antioxidant activity

近年来，含有益生元与益生菌的食品因其对调节人体肠道的生态平衡具有积极作用而备受广大消费者的青睐。膳食纤维作为“第七大营养素”，在保持人体肠道消化系统健康方面承担着重要作用，越来越多的食品配方中出现了富含膳食纤维的谷物、水果副产物，主要发挥其益生元的作用以促进肠道健康[1]，其中水溶性膳食纤维(SDF)在调节肠道菌群方面具有重要作用，其含量的高低通常是评价膳食纤维品质优劣的重要指标[2]。发酵乳是以牛乳或者乳制品为原料通过活性益生菌发酵的乳制品，富含蛋白质、钙、维生素、碳水化合物等营养物质，可改善人体内微生物菌群平衡，具有良好的益生功能。发酵乳制品作为益生菌的优良载体，其消费规模占国内益生菌整体市场的78.4%[3]，其中谷物发酵乳因富含膳食纤维与益生菌迎合了谷物加工新趋势，成为深受人们喜爱的功能保健食品[4]。

燕麦麸皮为燕麦加工后的副产物，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[5]，但因食用口感不佳，在实际生产中并未得到有效应用。燕麦中膳食纤维质量分数为13.6%~30.2%[6]，95%以上的SDF都分布在除去胚乳后的燕麦麸皮中[7]，其中SDF主要成分为β-葡聚糖，占干质量的2.1%~3.9%[8]，具有增稠性、乳化性等功能特性，可以作为功能性食品配料应用于多种食品中[9]。刘昊飞[10]发现豆渣SDF对酸性乳饮料具有良好的稳定作用，可作为一种优良的酸性乳饮料稳定剂。Medina等[11]发现水溶性膳食纤维可选择性地刺激益生菌的生长和活力，并且使其增殖。罗磊[12]、黄萍[13]等分别发现绿豆皮及米糠中可溶性膳食纤维具有较强的抗氧化性，并且SDF更易被肠道内的细菌发酵，因此SDF可作为功能性食品原料应用于发酵乳中，用以改善发酵乳品质及抗氧化活性。微波改性作为膳食纤维的一种物理改性方式，可通过电磁波产生的剧烈振动和空化效应，造成物料分子间相互挤压，达到改善物料性能的作用[14]。作者在实验前期采用微波改性燕麦麸膳食纤维，对改性后的燕麦麸SDF进行品质评价，并将其作为功能性食品配料应用于发酵乳中，研究其对发酵乳品质及抗氧化活性的影响，构建益生元、益生菌、发酵乳的协同关系，以期为燕麦麸SDF综合应用以及功能性发酵乳的深度开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

燕麦麸膳食纤维：作者所在实验室制备；生牛乳：购于上海练江牧场；YF-L812型发酵剂(含德氏乳杆菌保加利亚亚种(*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bularicus*)、嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*))、LA-5型嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)：购于丹麦科汉森股份有限公司。

水杨酸、铁氰化钾、三氯乙酸：购于国药集团化学试剂有限公司；硫酸亚铁：购于天津科密欧试剂有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)：购于美国Sigma-Aldrich公司；其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

FW135中草药粉碎机：天津市泰斯特仪器有限公司产品；800型离心分离机：北京医用离心机厂制造；FE20型pH计：上海恒磁电子科技有限公司产品；G80F20CN2L-B8微波炉：格兰仕微波炉电器有限公司产品；AR1500型流变仪：英国TA公司产品；TA. XT Plus质构仪：英国Stable Micro-Systems

公司产品;FA40 高剪切分散乳化机:上海弗鲁克科技发展有限公司产品;JEM-200CX 型高分辨透射电镜:日本 JEOL 公司产品;XMTA-608 电热鼓风干燥箱:上海佳胜实验设备有限公司产品;LK01 型立式全自动酸奶机:河南绿科电器科技有限公司产品。

1.3 方法

1.3.1 微波改性制备燕麦麸 SDF 工艺条件 燕麦麸膳食纤维与水按料液质量体积比 1 g:20 mL 混合配成溶液,于微波功率 600 W 条件下处理 5 min,进行微波改性。抽滤取其上清液,加入 4 倍体积的无水乙醇,于冰箱内 4 ℃条件下静置 12 h,放置离心机内以 5 000 r/min 转速离心 20 min,将沉淀物在 60 ℃干燥箱内烘干,得到微波改性燕麦麸 SDF 粉末(质量分数≥90%)。

1.3.2 改性前后燕麦麸 SDF 质量分数的测定 燕麦麸 SDF 及 β-葡聚糖质量分数的测定参照 AOAC 991.43 和 AOAC 995.16 方法,由试剂盒测定;戊聚糖质量分数采用 Douglas 法测定[15]。

1.3.3 燕麦麸 SDF 微观形态观察及理化特性测定 将未经改性处理的燕麦麸 SDF 对照品和微波改性处理得到的燕麦麸 SDF 经干燥处理后置于载物台上,通过离子溅射进行喷金处理提高导电性。设定扫描电压为 15 kV,放大倍数为 1 000 倍,通过扫描电镜观察燕麦麸 SDF 改性前后的微观形态。参照文献[13]的方法对微波改性制备的燕麦麸 SDF 持水力、结合水力、持油力、溶胀性、溶解性进行测定。

1.3.4 发酵乳生产工艺 取鲜牛乳 100 mL,分别加入 1%、2%、3%、4%、5%(质量分数)改性燕麦麸 SDF 和 5 g 白砂糖进行溶解,密封后于 95 ℃灭菌 10 min,冷却至 42 ℃后接种质量分数 0.2‰的 YF-L812 型发酵剂和质量分数 0.1‰嗜酸乳杆菌(益生菌),于(42±1) ℃进行凝乳,待滴定酸度达到 60~70 °T 时,放置 4 ℃冰箱进行后熟 24 h,得到改性燕麦麸 SDF 发酵乳成品。

1.3.5 乳酸菌活菌数测定 采用 MRS 平板计数法进行乳酸菌活菌数的测定[16]。

1.3.6 改性燕麦麸 SDF 对发酵乳乳清析出率和持水力的影响 乳清析出率的测定参照姚淑渠[17]方法略做修改。称取 4 ℃冷藏 5 d 的改性燕麦麸 SDF 发酵乳样品5~10 g(质量记为 m),将样品放入离心机以 3 000 r/min 的转速离心 15 min,去除上清液并称质量(上清液质量记为 m_1)。根据公式(1)计算乳清析出率。

$$乳清析出率(\%)=\frac{m_1}{m}\times 100\% \quad (1)$$

持水力的测定参照文献[18]的方法略作改动。称取 10~15 mL 改性燕麦麸 SDF 发酵乳倒入离心管(离心管质量记为 M_0,发酵乳和离心管的质量和记为 M_1)。将装有发酵乳的离心管放入离心机,以 3 000 r/min 的转速离心 15 min,除去上清液后称量沉淀物质量(记为 M_2)。根据公式(2)计算持水力。

$$持水力(\%)=\frac{M_2-M_0}{M_1-M_0}\times 100\% \quad (2)$$

1.3.7 改性燕麦麸 SDF 对发酵乳酸度的影响 酸度的测定按 GB 5009.239—2016 执行;发酵乳的 pH 由 FE20 型 pH 计直接测定。

1.3.8 改性燕麦麸 SDF 对发酵乳质构特性的影响 将添加不同质量分数的改性燕麦麸 SDF 发酵乳样品于4 ℃冰箱内冷藏 24 h 后取出,采用 TA. XT Plus 质构仪进行 TPA(质地剖面分析)测试,每个样品测定 3 次。测试探头选择圆柱形挤压探头 P/0.5,测定下压距离 30 mm,测试前探头下压速度 2 mm/s,测试过程中速度 1 mm/s,测试后速度 2 mm/s,最小触发力 0.4 N。

1.3.9 改性燕麦麸 SDF 对发酵乳储能模量和损失模量的影响 采用 AR1500 型流变仪,选用 60 mm 测量系统,设置温度为 5 ℃,缝隙为 1 mm,选用振荡频率模式。取少量添加改性燕麦麸 SDF 发酵乳置于探头上,在 0.1~36.0 Hz 进行储能模量和损失模量的测定。

1.3.10 改性燕麦麸 SDF 对发酵乳感官品质的影响 依照国标 GB 19302—2010,从色泽、风味、口感和组织状态方面制定改性燕麦麸 SDF 发酵乳感官评定标准(见表 1)。选取 10 位具有发酵乳感官评定经验的专业教师和专业技术人员以表 1 为依据进行感官评定,总分 100 分,取 10 人评分的平均值作为感官评分得分。

1.3.11 改性燕麦麸 SDF 对发酵乳抗氧化活性的影响 DPPH 自由基清除能力参考文献[19]的方法进行测定,羟自由基清除能力参考文献[20]的方法进行测定,超氧阴离子自由基清除能力参照文献[21]的方法进行测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 统计软件进行方差及显著性分

表 1　发酵乳感官评分标准

Table 1　Sensory evaluation standards of fermented milk

评定项目	评定标准	分数
色泽	色泽均匀,呈乳白色,有光泽	15~20
	色泽均匀,呈乳白色,有一定光泽	9~14
	色泽不均匀,乳白色略带淡黄色,没有光泽	0~8
风味	风味浓郁,具有发酵乳的特殊香味	15~20
	风味一般,发酵乳的滋味较淡,香味不足	9~14
	风味不足,发酵乳的滋味、香味较差	0~8
口感	口感细腻爽滑,酸甜适口	25~30
	口感较为细腻爽滑,酸甜感一般	15~24
	口感不够细腻,有苦涩感	0~14
组织状态	组织细腻,凝固性好,无或有少量乳清析出	25~30
	组织较为细腻,凝固性一般,有少量乳清析出	15~24
	组织粗糙,凝固性差,出现大量乳清析出以及分层现象	0~14

析,P<0.05 为差异显著,每组实验重复操作 3 次进行测定,运用 Origin 8.0 软件对数据进行处理绘图。

2 结果与分析

2.1　微波改性对燕麦麸 SDF 质量分数的影响

由表 2 可知,微波改性对燕麦麸 SDF 质量分数产生了一定的影响。改性后燕麦麸 SDF 质量分数达到 17.06%,与对照组相比提高了 71.98%。微波改性提高了燕麦麸 SDF 质量分数可能是由于物料在电磁波作用下产生了剧烈振动和空化效应,随着温度的升高,分子间化学键断裂,促进部分多糖组分发生降解,使得木质素、纤维素等被水解去除[22],致使更多的不溶性膳食纤维被转化,从而提高了 SDF 质量分数。燕麦 SDF 主要为 β-葡聚糖[23],而燕麦麸中水溶性 β-葡聚糖能否被释放游离出来直接关系到燕麦的生理活性功能[7],经微波改性后 β-葡聚糖质量分数达到 10.33%,与对照组相比提高了 39.22%,而水溶性戊聚糖质量分数提高了 1.69 倍。因此,微波改性可有效提高燕麦麸 SDF 质量分数,是获得高品质 SDF 的有效改性途径。

表 2　微波改性对燕麦麸 SDF 质量分数的影响

Table 2　Effects of microwave modification methods on the soluble dietary fiber content of oat bran

组别	SDF 质量分数/%	β-葡聚糖质量分数/%	戊聚糖质量分数/%
微波改性组	17.06±0.03^a	10.33±0.14^a	6.24±0.06^a
对照组	9.92±0.04^b	7.42±0.04^b	2.32±0.03^b

注:表中数据为 $x\pm s$,n=3;同列字母不同表示差异性显著(P<0.05),下表同。

2.2　燕麦麸 SDF 扫描电镜观察及理化特性分析

图 1 所示,未经改性的燕麦麸 SDF 结构疏松,空隙较大。微波改性制备的燕麦麸 SDF(见图 2),结构更为疏松多孔,且呈现出复杂、细密的网状结构,比表面积增大,说明微波改性改变了燕麦麸 SDF 的表面结构。表 3 结果显示,微波改性制备的燕麦麸 SDF 具有较好的持水力、结合水力、持油力、溶胀性、溶解性,这可能是因为微波改性使膳食纤维大分子组分转变为小分子的可溶性组分[24],从而提高了其理化特性,这与扫描电镜中微观结构的改变结果相吻合。因此,微波改性对燕麦麸 SDF 的理化性质均有良好的改善作用,可提高燕麦麸 SDF 的加工品质,故将微波改性燕麦麸 SDF 应用于发酵乳中。

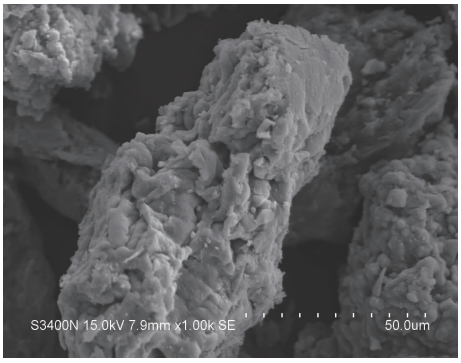


图 1　未改性燕麦麸 SDF 扫描电镜图(×1 000)

Fig. 1　Scanning electron microscope image of the unmodified oat bran SDF(×1 000)

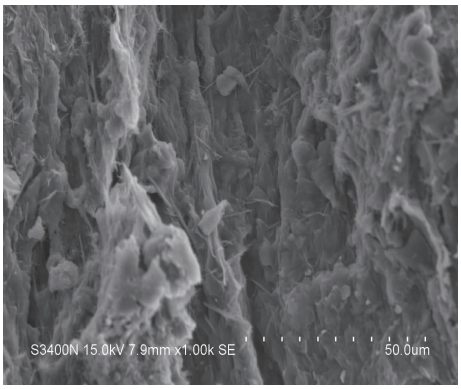


图 2　微波改性燕麦麸 SDF 扫描电镜图(×1 000)

Fig. 2　Scanning electron microscope image of the microwave modified oat bran SDF(×1 000)

2.3　改性燕麦麸 SDF 对乳酸菌活菌数的影响

发酵乳中益生菌只有达到一定的数量才能保证其益生作用[25],因此乳酸菌活菌数对发酵乳的品质及生理功能影响较大。由表 4 可知,随着改性燕

表 3　改性燕麦麸 SDF 理化特性

Table 3　Physical and chemical properties of modified oat bran SDF

	持水力/(g/g)	结合水力/(g/g)	持油力/(g/g)	溶胀性/(mL/g)	溶解性/(g/mL)
微波改性组	3.26±0.22^{a}	4.02±0.24^{a}	3.47±0.16^{a}	3.44±0.18^{a}	0.18±0.05^{a}
对照组	2.36±0.10^{b}	3.04±0.08^{b}	1.86±0.12^{b}	1.56±0.12^{b}	0.09±0.03^{b}

麦麸SDF 添加质量分数的增大，乳酸菌活菌数呈现正比例递增趋势，由(4.16±0.32)×10^{8} CFU/mL 增加至(1.18±0.26)×10^{9} CFU/mL，均满足国家标准对发酵乳中乳酸菌活菌总数须大于 1×10^{6} CFU/mL 的要求。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数大于 3%时，其乳酸菌活菌数显著高于对照组(P<0.05)；当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数增加至 5%时，乳酸菌活菌数达到 1×10^{9} CFU/mL 以上，说明发酵乳中添加燕麦麸 SDF 对乳酸菌具有增殖作用，可以显著提高发酵乳中益生菌的数量。这与杜亚军[26]得出水溶性膳食纤维可促使益生菌大量增殖，是一种良好的益生菌增殖因子的结论相一致。益生菌可通过分解代谢产生氨基酸及肽，从而提高产品的营养价值，改善风味。因此，发酵乳中改性燕麦麸 SDF 添加质量分数高于 3%时可以显著增加乳酸菌的数量，提高发酵乳的益生效果及品质。

表 4　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳乳酸菌活菌数的影响

Table 4　Effect of modified oat bran SDF on viable cell count of fermented milk

改性燕麦麸 SDF 添加质量分数/%	乳酸菌活菌数/(CFU/mL)
0	(4.16±0.32)×10^{8c}
1	(4.94±0.28)×10^{8bc}
2	(6.26±0.42)×10^{8bc}
3	(7.48±0.34)×10^{8bc}
4	(8.24±0.44)×10^{8b}
5	(1.18±0.26)×10^{9a}

注：同列字母不同表示差异显著(P<0.05)，下表同。

2.4　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳稳定性的影响

通常情况下，乳清析出率和持水力表示发酵乳的稳定性，持水力越高表明稳定性越好，乳清析出率越高则稳定性越差。不同添加质量分数的改性燕麦麸 SDF 对发酵乳乳清析出率及持水力的影响如图 3 所示。发酵乳的持水力和乳清析出率成反比关系，持水力随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加呈现先上升后下降的趋势，乳清析出率随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加呈现先降低后升高的趋势。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时，持水力达到 94.82%，比未添加改性燕麦麸 SDF 的发酵乳的持水力高出 41.9%；发酵乳的持水力受其中酪蛋白的含量影响较大，酪蛋白在发酵条件下可形成网状空间胶体结构[18]，此结构可将更多的水分子和小分子物质包裹住。添加一定量的改性燕麦麸 SDF 后由于其结构中含有大量亲水基团，进一步增强了发酵乳中酪蛋白胶体颗粒的网络结构，同时也增强了对水分的束缚能力，从而抑制了乳清析出，提高了发酵乳持水力。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数大于 4%时，发酵乳的持水力呈现下降趋势，可能是因为过量的多糖破坏了蛋白质之间的互相聚集作用，导致乳清析出增多，从而导致持水力下降[27]。因此，改性燕麦麸 SDF 添加质量分数小于 4%时可提高发酵乳的持水性，降低乳清析出率，改善产品稳定性。

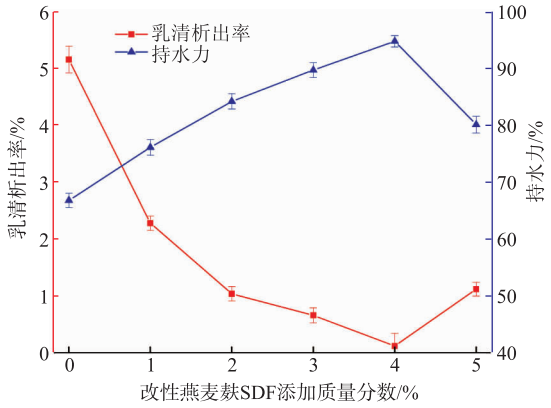


图 3　改性燕麦麸 SDF 添加质量分数对乳清析出率及持水力的影响

Fig. 3　Effect of modified oat bran SDF addition on whey exhalation rate and water holding capacity

2.5　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳酸度的影响

不同改性燕麦麸 SDF 添加质量分数对发酵乳滴定酸度及 pH 的影响如图 4 所示。随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加，发酵乳的滴定酸度呈上升趋势，均显著高于未添加改性燕麦麸 SDF 的对照组(P<0.05)。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时，发酵乳的滴定酸度达到 80.17 °T，由此可见改性燕麦麸 SDF 具有促进发酵乳产酸的作用。实验

过程中发现改性燕麦麸 SDF 对乳酸菌具有增殖作用,而乳酸菌的生长过程中会利用多糖类物质进行发酵产生乳酸及其他有机酸类[28],因此呈现酸度上升现象。随着改性燕麦麸SDF 添加质量分数的增加,发酵乳的 pH 呈现下降趋势,但下降的趋势较为缓慢。燕麦麸 SDF 作为益生菌发酵的底物,可为其生长提供有利环境,燕麦麸 SDF 转化产生的短链脂肪酸以及发酵产生的乳酸使得 pH 降低,这与滴定酸度的结果相吻合。发酵乳的 pH 一般维持在 4.00~4.25 时口感较好[29],当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时,发酵乳的 pH 为 4.16,具有较好的口感及良好的组织状态,这与李宁宁等[19]得到的结论类似,说明改性燕麦麸 SDF 作为益生元,有促进乳酸菌生长作用,可加快发酵乳产酸,发酵乳中添加 4%的改性燕麦麸 SDF 可改善口感及风味。

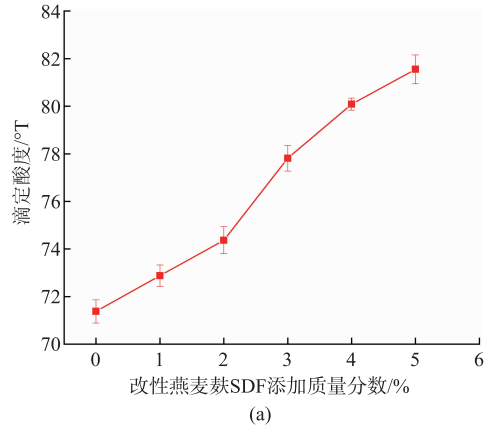
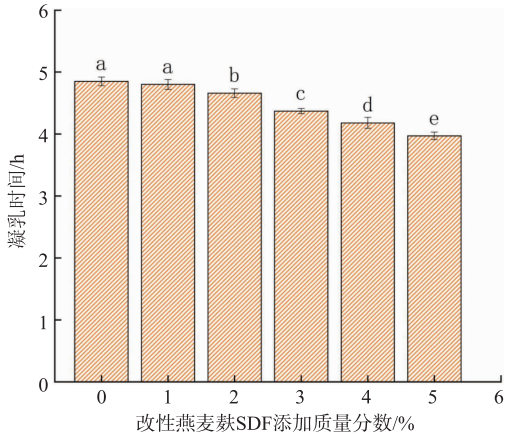


图 4　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳滴定酸度和 pH 的影响

Fig. 4　Effect of modified oat bran SDF on the titratable acidity and pH of fermented milk

2.6　改性燕麦麸 SDF 对凝乳时间的影响

图 5 所示,发酵乳的凝乳时间随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加而缩短,当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 1%时,与未添加改性燕麦麸 SDF 的对照组差别不显著(P>0.01)。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数大于 2%时,凝乳时间显著缩短(P<0.05)。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时,凝乳时间为 4.18 h,比对照组缩短了 13.81%,当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数大于 4%时,凝乳时间持续缩短,但是发酵乳的口感较酸。这是因为改性燕麦麸 SDF 作为益生元促进了乳酸菌的生长,加快乳酸产生的速度,从而缩短了凝乳时间,这与表 4、图 4 中所得出的随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加,乳酸菌活菌数增多,发酵乳的酸度上升、pH 下降的结论相吻合,说明添加改性燕麦麸 SDF 可缩短凝乳时间。综合考虑改性燕麦麸 SDF 对发酵乳口感、风味及发酵时间的影响,确定改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%比较适宜。



字母不同表示差异显著(P<0.05),下图同。

图 5　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳凝乳时间的影响

Fig. 5　Effect of modified oat bran SDF on coagulation time of fermented milk

2.7　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳质构特性的影响

由表 5 可知,随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增加,发酵乳的硬度、黏性、胶着性、弹性、内聚性均呈现先增加后降低的趋势。当改性燕麦麸 SDF 的添加质量分数为 1%~4%时,发酵乳的硬度显著高于空白对照组(P<0.05),改性燕麦麸 SDF 添加质量分数达到 4%时,发酵乳的硬度达到 186.07 g,同时发酵乳的黏性、胶着性、弹性、内聚性亦达到了最大值,分别为 108.87 g、38.36 g、89.27 mm、0.453;当改性燕麦麸 SDF 的添加质量分数大于 4%时,发酵乳的质构特性呈现显著下降趋势(P<0.05)。添加改

表 5　改性燕麦麸 SDF 发酵乳的质构特性

Table 5　Textural properties of modified oat bran SDF fermented milk

改性燕麦麸 SDF 添加质量分数/%	硬度/g	黏性/g	胶着性/g	弹性/mm	内聚性
0	136.54±4.18^{d}	76.64±2.68^{d}	26.78±1.36^{c}	56.28±0.98^{e}	0.427±0.01^{b}
1	150.38±3.64^{c}	78.28±1.92^{d}	27.14±1.62^{c}	68.36±1.06^{d}	0.437±0.01^{ab}
2	154.62±4.26^{c}	88.16±1.83^{c}	32.47±1.72^{b}	75.82±1.34^{c}	0.440±0.01^{ab}
3	168.14±3.82^{b}	96.28±2.26^{b}	36.68±1.24^{a}	82.81±1.26^{b}	0.443±0.01^{ab}
4	186.07±3.98^{a}	108.87±1.82^{a}	38.36±0.96^{a}	89.27±1.16^{a}	0.453±0.01^{a}
5	174.29±4.12^{b}	96.62±2.41^{b}	31.24±2.18^{b}	76.63±1.22^{c}	0.443±0.02^{ab}

性燕麦麸SDF 使得发酵乳的质构特性得以增强的原因可能在于改性燕麦麸 SDF 与牛乳中的酪蛋白相互作用,发酵过程中其凝胶特性促进了内部分子之间的相互作用,使相互聚集形成的网状结构更加稳定,增强发酵乳的硬度[30]。改性燕麦麸 SDF 的添加,使发酵乳的黏性、胶着性、弹性、内聚性与空白对照组相比较,都有所增加,说明添加改性燕麦麸 SDF 的发酵乳具有黏稠的口感,较为稳定的凝胶特性，这与百香果膳食纤维致使酸乳的硬度降低、质地变软、胶着性差[1]的结果不相符,可能是因为微波改性后使燕麦麸 SDF 的微观结构发生变化,具备了更强的结合水力及凝胶能力,从而提高了发酵乳的质构特性，与利用超声辅助纤维素酶提取的米糠 SDF[13]具有相类似的理化特性。但是过量添加改性燕麦麸 SDF 会破坏酪蛋白分子间的相互作用,影响凝胶网络结构的形成及稳定,从而导致发酵乳的质构特性下降。因此,改性燕麦麸SDF 添加质量分数为 4%时,发酵乳具有较好的质构特性。

2.8　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳感官品质的影响

不同添加质量分数的改性燕麦麸 SDF 对发酵乳感官品质的影响如图 6 所示。添加改性燕麦麸 SDF 对发酵乳的色泽影响不显著(P>0.05),发酵乳色泽均匀。添加质量分数 1%~4%的改性燕麦麸 SDF 对发酵乳的风味影响不显著，发酵乳风味宜人;当添加质量分数 5%的改性燕麦麸 SDF,发酵乳的风味变化显著(P<0.05),发酵乳香味变淡。不同添加质量分数的改性燕麦麸 SDF 对发酵乳的口感影响较为显著，当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时,发酵乳的口感细腻顺滑;改性燕麦麸 SDF 添加质量分数超过 4%时,口感下降。改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 3%~4%时，发酵乳的组织状态评分较高,内部组织细腻,乳清析出现象不明显;当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数高于 4%时，组织状态评分下降,部分乳清析出,内部组织呈现砂粒感,这可能是因为过多的改性燕麦麸 SDF 破坏了发酵乳的凝胶结构,导致乳清析出,产品感官品质下降。因此,适当添加改性燕麦麸 SDF 可以改善发酵乳的感官品质,当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时,发酵乳可获得较好的色泽、口感、风味以及组织状态。

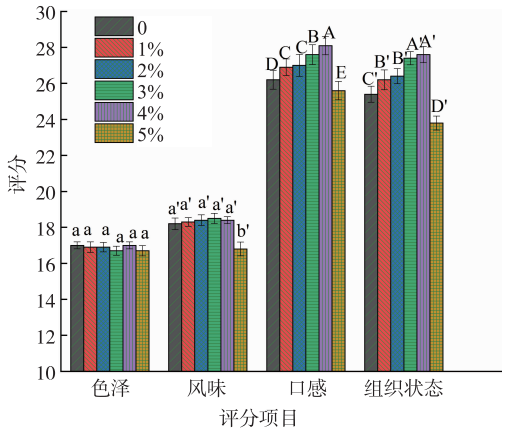


图 6　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳感官品质的影响

Fig. 6　Effect of modified oat bran SDF on the sensory quality of fermented milk

2.9　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳储能模量和损失模量的影响

储能模量 G'和损失模量 G''是发酵乳流变学性质的重要指标，主要反映发酵乳凝胶强度的大小。不同添加质量分数的改性燕麦麸 SDF 发酵乳频率扫描曲线的储能模量和损失模量分别如图 7 和图 8 所示。改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 1%~5%时发酵乳的储能模量 G'和损失模量 G''都发生了明显的变化,逐渐呈现递增趋势,高于未添加对照组,并且 G'均大于 G''，说明在不同的频率变化范围内发酵乳储存的能量增大,凝胶强度变大,符合凝胶网

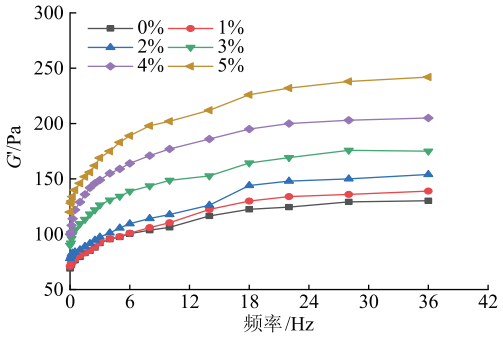


图 7　发酵乳储能模量G'变化曲线

Fig. 7　Changes in the storage modulus G' of fermented milk

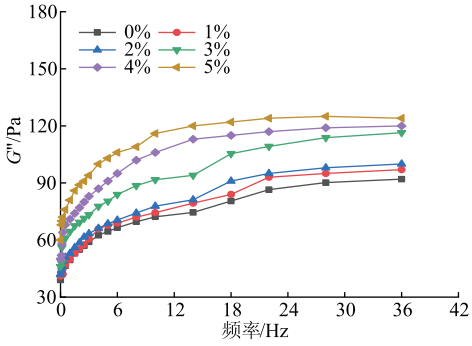


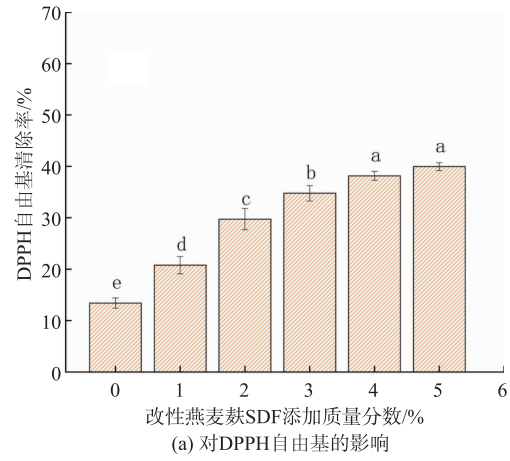
图 8　发酵乳损失模量G''变化曲线

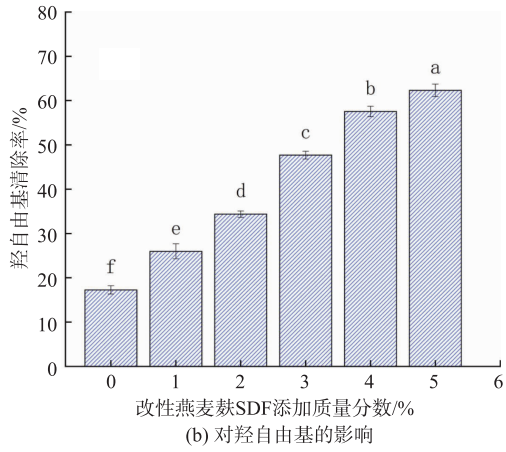
Fig. 8　Changes in the loss modulus G'' of fermented milk

状结构的特征。储能模量 G'和损失模量 G''的变化曲线表明添加改性燕麦麸 SDF 的发酵乳形成了弱凝胶网状结构,具有黏弹性的性质[31]。因此,发酵乳中添加改性燕麦麸 SDF 可以有效改善发酵乳的流变学特性,赋予产品凝胶品质。

2.10　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳抗氧化活性的影响

由图 9(a)可知,改性燕麦麸 SDF 添加质量分数在1%~5%时发酵乳的 DPPH 自由基清除能力呈现上升趋势,不同组别均显著高于对照组(P<0.05)。改性燕麦麸 SDF 添加质量分数在 1%~3%时上升较快,大于3%时则上升缓慢并逐渐趋于平缓。当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数为 4%时,对 DPPH 自由基的清除率达到 38.16%;改性燕麦麸 SDF 添加质量分数大于 4%时变化不显著(P>0.05),DPPH 自由基清除率最高可达到 39.97%。由图 9(b)可知,发酵乳对羟自由基的清除能力随着改性燕麦麸 SDF 添加质量分数的增大而不断增强,当改性燕麦麸 SDF 添加质量分数大于 1%时,发酵乳的羟自由基清除能力逐渐提高且与对照组存在显著差异(P<0.05),





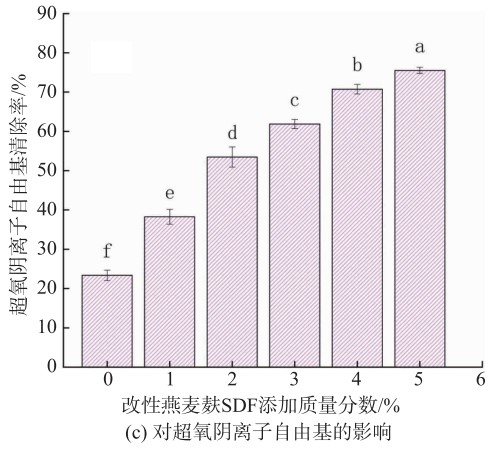


图 9　改性燕麦麸 SDF 对发酵乳 DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基清除能力的影响

Fig. 9　Effect of modified oat bran SDF on DPPH, hydroxyl free radical and superoxide anion radical scavenging ability of fermented milk

羟自由基清除率最高达到62.30%,这是因为改性燕麦麸 SDF 疏松的结构会暴露出更多的供氢体或电

子供体[32],从而提升其清除羟自由基能力。发酵乳对超氧阴离子自由基的清除能力高于DPPH自由基及羟自由基清除能力,如图9(c)所示。超氧阴离子自由基的清除能力随着改性燕麦麸SDF添加质量分数的增加而不断增强,变化趋势与羟自由基相同,超氧阴离子自由基的清除率最高可达到75.51%。综上,添加改性燕麦麸SDF发酵乳对DPPH自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基具有不同程度的清除能力,体现了较好的抗氧化活性。

3 结 语

微波改性制备的燕麦麸SDF作为功能性原料应用于发酵乳工艺,对发酵乳乳酸菌活菌数、稳定性、pH和酸度、凝乳时间、质构特性、感官品质、储能模量和损失模量、抗氧化活性影响显著。当改性燕麦麸SDF添加质量分数为4%时,可促进乳酸菌增殖,提高发酵乳的益生效果,改善发酵乳的口感及组织状态,赋予产品良好的质构特性,改善了发酵乳的流变学特性,形成弱凝胶网状结构,能显著提高发酵乳的抗氧化活性。因此,在发酵乳中添加改性燕麦麸SDF,可提高发酵乳稳定性及益生效果,改善发酵乳的口感及组织状态,提高发酵乳的品质。

参考文献:

[1] 黄子珍,陈超锋,曾庆坤,等. 百香果膳食纤维对凝固型益生菌酸水牛乳品质特性的影响[J]. 食品科技,2019,44(7):314-319.
[2] CASSIDY Y M,MCSORLEY E M,ALLSOPP P J. Effect of soluble dietary fibre on postprandial blood glucose response and its potential as a functional food ingredient[J]. **Journal of Functional Foods**,2018,46:423-439.
[3] 李楠,刘振民. 益生菌与功能发酵乳开发研究进展[J]. 乳业科学与技术,2020,43(3):31-38.
[4] SHERMAK M A,SAAVEDRA J M,JACKSON T L,et al. Effect of yogurt on symptoms and kinetics of hydrogen production in lactose-malabsorbing children[J]. **American Journal of Clinical Nutrition**,1995,62(5):1003-1006.
[5] 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.
[6] STERNA V,ZUTE S,BRUNAVA L. Oat grain composition and its nutrition benefice[J]. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**,2016,8:252-256.
[7] 栗红瑜,马晓凤,许光映,等. 不同加工工艺对燕麦麸显微结构及有效成分溶出影响[J]. 食品科学,2007,28(10):261-263.
[8] ROUBROEKS J P,ANDERSSON R,MASTROMAURO D L. Molecular weight,structure and shape of oat(1-3),(1-4) glucose fractions obtained by enzymatic degradation[J]. **Carbohydrate Polymers**,2001,46(3):275-285.
[9] 申瑞玲,董吉林,程珊珊. 燕麦β-葡聚糖酸奶的研制[J]. 粮油加工,2007(11):123-125.
[10] 刘昊飞. 豆渣水溶性膳食纤维在酸性乳饮料中的应用[J]. 大豆科学,2014,33(4):613-615.
[11] MEDINA R,KATZ M,GONZALEZ S,et al. Characterization of the lactic acid bacteria in ewe's milk and cheese from northwest Argentina[J]. **Journal of Food Protection**,2001,64(4):559-563.
[12] 罗磊,王雅琪,马丽苹,等. 绿豆皮可溶性膳食纤维的抗氧化作用[J]. 食品科学,2018,39(3):182-187.
[13] 黄萍,林亲录,朱凤霞,等. 米糠水溶性膳食纤维理化特性及抗氧化性[J]. 食品科学,2017,38(23):14-19.
[14] ADISAK N,SUWIT P,SOMCHART S. Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2019,116:105-117.
[15] DOUGLAS S G. A rapid method for the determination of pentosans in wheat flour[J]. **Food Chemistry**,1981,7(2):139- 145.
[16] LI S,SHAH N P. Effects of *Pleurotus eryngii* polysaccharides on bacterial growth,texture properties,proteolytic capacity,and angiotensin-I-converting enzyme-inhibitory activities of fermented milk[J]. **Journal of Dairy Science**,2015,98(5):2949-2961.
[17] 姚淑渠. 老酸奶发酵生产工艺优化研究[J]. 现代农业科技,2012(9):369-371.
[18] 赵岩岩,赵圣明,李帅,等. 山楂叶多糖对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学,2020,41(2):73-79.
[19] 李宁宁,王正荣,孙春晓,等. 牛蒡多糖对发酵乳品质和抗氧化性的影响[J]. 食品与发酵工业,2019,45(10):97-103.
[20] SHEN Y B,ZHANG H,CHENG L L,et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland

barley[J]. **Food Chemistry**,2016,194:1003-1012.
[21] 束文秀,吴祖芳,翁佩芳,等. 植物乳杆菌和发酵乳杆菌对胡柚汁发酵品质及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学,2019,40(2):152-158.
[22] CHEN B F,CAI Y J,LIU T X,et al. Improvements in physicochemical and emulsifying properties of insoluble soybean fiber by physical-chemical treatments[J]. **Food Hydrocolloids**,2019,93:167-175.
[23] 牛希,史乾坤,赵城彬,等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品科学,2020,41(23):130-136.
[24] CHEN J L,GAO D X,YANG L T,et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber [J]. **Food Research International**,2013,54(2):1821-1827.
[25] 何君,韩育梅,刘敏,等. 菊粉和低聚果糖对发酵乳品质的影响[J]. 中国食品学报,2019,19(11):116-123.
[26] 杜亚军. 水溶性膳食纤维促进肠道益生菌生长的研究[J]. 中国乳品工业,2015,43(7):26-29.
[27] HASSAN A N,IPSENPSEN R,JANZEN T,et al. Microstructure and rheology of yogurt made with cultures differing only in their ability to produce exopolysaccharides[J]. **Journal of Dairy Science**,2003,86(5):1632-1638.
[28] JUNG J,PAIK H D,YOON H J,et al. Physicochemical characteristics and antioxidant capacity in yogurt fortified with red ginseng extract[J]. **Korean Journal for Food Science of Animal Resources**,2016,36(3):412-420.
[29] 包熠莹. 储存温度和时间对酸奶 pH 值影响的研究[J]. 科技创新与应用,2017,4(5) :79.
[30] 汪丽. γ- 聚谷氨酸对凝固型酸奶的稳定作用机理研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2016.
[31] RAMCHANDRAN L,SHAH N P. Characterization of functional,biochemical and textural properties of synbiotic low-fat yogurts during refrigerated storage[J]. **LWT-Food Science and Technology**,2010,43(5):819-827.
[32] 付旭恒,吴伟,吴晓娟,等. 米糠贮藏时间对米糠可溶性膳食纤维抗氧化性质的影响[J]. 中国油脂,2017,42(8):32-36.

科　技　信　息

欧盟评估果糖硼酸钙作为新型食品的安全性

2021 年 7 月 5 日,据欧盟食品安全局(EFSA)消息,欧盟营养、新型食品和食物过敏源(NDA)研究小组就果糖硼酸钙(Calcium fructoborate)作为新型食品的安全性发表科学意见。

经过评估,专家小组得出结论,在提议的用途和使用水平下,果糖硼酸钙作为新型食品是安全的。

[信息来源]食品伙伴网.欧盟评估果糖硼酸钙作为新型食品的安全性[EB/OL]. (2021-7-6). http://news.foodmate.net/2021/07/598686.html