

芝麻酚对鱼油酸奶品质及氧化稳定性的影响

高智辉¹, 纪忠妍¹, 王雷喜¹, 孙明凯¹, 刘亮¹, 孙庆杰¹, 邓乾春², 董绪燕^{1*}

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109; 2. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062)

摘要: 目的 开发含二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)鱼油的强化型酸奶, 探究芝麻酚对鱼油酸奶品质及氧化稳定性的影响。**方法** 将含芝麻酚的鱼油乳液应用于发酵酸奶中, 通过分析酸奶的感官评价、pH、持水力、质构特性、流变特性、自由基清除活性、脂质氧化产物和 DHA 保留率的变化, 探究芝麻酚对鱼油强化酸奶发酵品质和氧化稳定性的影响。**结果** 鱼油乳液的添加对酸奶的 pH 和自由基清除活性无显著性影响, 但降低了感官评价、持水力、硬度、4°C恒温黏度、储能模量、损耗模量和 4~30°C变温黏度, 加速了脂质氧化。芝麻酚的添加未显著改变含鱼油酸奶的 pH, 增加了感官评价、持水力、硬度、4°C恒温黏度、储能模量、损耗模量和 4~30°C变温黏度, 提高了自由基清除活性、脂质氧化稳定性和 DHA 保留率(81.19%)。**结论** 添加 300 μmol/L 芝麻酚显著改善鱼油酸奶的品质, 并提高了酸奶的抗氧化功效, 为 DHA 酸奶产品的开发提供了理论参考。

关键词: 芝麻酚; 鱼油; 酸奶; 品质; 氧化稳定性

Effects of sesamol on the quality and oxidative stability of fish oil yogurt

GAO Zhi-Hui¹, JI Zhong-Yan¹, WANG Lei-Xi¹, SUN Ming-Kai¹, LIU Liang¹,
SUN Qing-Jie¹, DENG Qian-Chun², DONG Xu-Yan^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2. Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

ABSTRACT: Objective To develop fortified yogurt containing docosahexaenoic acid (DHA) fish oil, and explore the effects of sesamol on the quality and oxidative stability of fish oil yogurt. **Methods** The fish oil emulsion containing sesamol was applied to fermented yogurt, and the effects of sesamol on the fermentation quality and oxidative stability of fish oil-fortified yogurt were investigated by analyzing the changes in sensory evaluation, pH, water holding capacity, textural properties, rheological properties, free radical scavenging activity, lipid oxidation products and DHA retention of yogurt. **Results** The addition of fish oil emulsion had no effects on pH and radical scavenging of yogurt, but reduced sensory evaluation, water holding capacity, hardness, 4°C thermostatic viscosity, energy storage modulus, loss modulus and variable temperature viscosity from 4 to 30°C, and accelerated lipid oxidation. The addition of sesamol did not significantly change the pH of fish oil-containing yogurt, increased sensory evaluation, water holding capacity, hardness, thermostable viscosity at 4°C, storage modulus, loss modulus and variable temperature viscosity from 4 to 30°C, and improved radical scavenging activity, lipid oxidation stability

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MC172、ZR2020MC206)、青岛农业大学高水平人才引进项目(663/1120085、663/1120084)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2022MC172, ZR2020MC206), and the Qingdao Agricultural University High-level Talent Introduction Project (663/1120085, 663/1120084)

*通信作者: 董绪燕, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能脂质研究与利用。E-mail: dongxuyan@qau.edu.cn

*Corresponding author: DONG Xu-Yan, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China. E-mail: dongxuyan@qau.edu.cn

and DHA retention (81.19%). **Conclusion** The addition of 300 $\mu\text{mol/L}$ sesamol can improve the quality of fish oil yogurt and enhance the antioxidant efficacy of the yogurt, providing a theoretical reference for the development of DHA yogurt products.

KEY WORDS: sesamol; fish oil; yogurt; quality; oxidation stability

0 引言

随着人们生活品质的提高,富含多种营养成分和利于肠胃消化的酸奶愈加受到消费者的喜爱^[1]。目前已有使用奇亚籽油^[2]、藻油^[3]、鱼油^[4]、核桃油^[5]等营养丰富的油脂为原料对酸奶进行营养强化,另外添加适量的紫薯多酚^[6]、石榴多酚^[7]、蓝莓多酚^[8]和茶多酚^[9]等植物基活性物质对酸奶进行功能性强化,不仅可以显著提高酸奶的抗氧化活性,还可以改善酸奶的感官品质以及防止其过度酸化。

多不饱和脂肪酸作为强化食品的营养原料具有巨大的开发潜力,成为食品开发领域的热门研究^[10]。鱼油富含二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)、二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)等多种多不饱和脂肪酸,对人体健康具有抗炎、抗癌、抗抑郁和血管保护活性,促进神经发育等相关益处^[11]。然而,富含DHA的多不饱和脂肪酸含有大量的不饱和键,相关产品在生产 and 储存过程中极易被氧化。氧化产物会对食品的风味、营养成分和货架期产生不利影响,甚至会损害消费者的身体健康。所以脂质氧化严重限制了鱼油等功能油脂在食品中的开发和应用。

天然抗氧化剂,是食品工业中用于抑制脂质氧化最直接、最有效的方法,如生育酚可以显著提高鱼油的氧化稳定性^[12]。此外,天然多酚具有强抗氧化性,且食用安全、无副作用等特点,使其在研究和生产中备受欢迎^[13]。芝麻酚是从芝麻中提取的植物来源的单酚类化合物,与合成抗氧化剂2,6-二叔丁基对甲酚(2,6-di-tert-butyl-4-methylphenol, BHT)相比,芝麻酚具有更好的抗氧化活性和健康益处^[14]。芝麻酚不仅能抑制葵花籽油、亚麻籽油、橄榄油和菜籽油等纯油脂的氧化^[15-16],还能抑制复杂体系中的脂质氧化,如芝麻酚在亚麻籽水包油(O/W)乳液和蜂蜡有机凝胶中可以显著抑制脂质氧化^[17-18]。目前关于芝麻酚的研究主要集中在其抗氧化活性,但是在实际产品应用的探索较少。

本研究将含芝麻酚的鱼油乳液添加至牛奶中发酵制成酸奶,探究芝麻酚对鱼油酸奶的品质和氧化稳定性的影响,以期开发DHA营养强化型酸奶提供理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

全脂牛乳(波兰 Mlekovita 有限公司);芝麻酚(纯度 $\geq 98\%$,上海易恩化学技术有限公司);鱼油(DHA 230 mg/g,

荷兰 DSM Nutritional Products 有限公司);冻干菌粉(湖北安琪酵母有限公司);白砂糖(青岛大润发超市);低聚果糖(武汉聚灿生物科技有限公司);分离乳清蛋白(纯度 95%,恒天然合作社集团有限公司)。

异辛烷、正己烷、甲醇(色谱纯)、过氧化氢异丙苯、异丙醇、异辛烷、正丁醇、铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁、盐酸、硫氰酸铵、氯化钡、硫酸亚铁、无水乙醇、氯化钠、氢氧化钠、酚酞、氢氧化钠、磷酸氢二钠、碳酸钠、叠化氮钠(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);硅胶(60~100目,青岛海洋化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

T25 高速搅拌装置、RV10D 真空旋转蒸发器(德国 IKA 有限公司);PCTHI-250T 恒温恒湿发酵箱(上海施都凯仪器设备有限公司);PHSJ-5T 型实验室 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司);TA.XT PlusC 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司);TG1 6-WS 高速台式离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司);MCR302 界面流变仪(上海安东帕商贸有限公司);UV-2700 紫外/可见分光光度计(日本岛津实验器材有限公司);ME54T/02 电子天平(精度 0.1 mg,瑞士 METTLER TOLEDO 有限公司);Scout™ SPX 电子天平(精度 0.01 g,上海奥豪斯国际贸易有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 无酚鱼油的制备

色谱硅胶用双蒸水反复清洗至无杂质,然后在 120°C 下活化 0.5 d。在智越具 G2 砂芯层析柱(50 mm 内径 \times 0.5 m 长度)的底层和顶层分别填充 100 g 层析硅胶,中间填充 20 g 活性炭。用 100 mL 正己烷溶解等量鱼油,装入层析柱,然后用 5 倍体积的正己烷洗脱。收集鱼油的玻璃器皿用铝箔包裹并放在冰浴中,避免收集过程中脂质快速氧化。收集的混合液体在-80°C下储存。使用前,溶剂使用 RV10D 真空旋转蒸发器在 37°C下去除,并用氮气吹干残留溶剂^[19]。

1.3.2 鱼油乳液的制备

乳清蛋白(1%)溶解在磷酸盐缓冲溶液(phosphate buffer saline, PBS, 10 mmol/L, pH 7.0)中形成水相。油相是通过将芝麻酚(乳液中浓度为 0 和 6 mmol/L)添加到鱼油中混合均匀。将 5%的油相和 95%的水相混合,通过 T25 高速搅拌装置以 15000 r/min 的转速处理 2 min,随后将初级乳液放在冰浴中,650 W 超声处理 5 min。所有样品添加 0.02%的

叠化氮钠防止微生物生长。

1.3.3 鱼油强化酸奶的制备

如表 1 所示, 将不同体积的全脂牛乳和鱼油乳液混合, 制成不同含量芝麻酚和 DHA 的混合溶液。混合溶液中白砂糖和低聚果糖的添加量分别为 5%、2%, 装入酸奶瓶中搅拌均匀, 巴氏杀菌(95℃, 5 min)。按质量分数 0.1%接种量加入发酵冻干菌粉, 旋紧酸奶瓶盖, 涡旋混匀, 置于 42℃恒温恒湿箱中发酵 8 h, 冷却后于 4℃冷藏 24 h 进行后熟, 酸奶成品于 4℃冰箱中避光贮存^[20]。

表 1 酸奶组成
Table 1 Composition of yogurt

样品	全脂牛乳 /mL	鱼油乳液 /mL	芝麻酚 /(μmol/L)	DHA 含量 /(mg/100 g)
对照酸奶	100	0	0	0
5%鱼油酸奶	95	5	0	115
5%芝麻酚鱼油酸奶	95	5	300	115
10%鱼油酸奶	90	10	0	230
10%芝麻酚鱼油酸奶	90	10	600	230

1.3.4 鱼油酸奶的感官评价

将酸奶装入规格一致的玻璃瓶中, 随机分组编号。挑选经过培训的 5 男 5 女, 作为感官评定人员。对酸奶的气味、色泽、口感滋味、组织状态和总体接受度进行评价, 评分标准见表 2。

表 2 酸奶感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation of yogurt

项目	标准	得分/分
气味	酸奶香气突出, 无鱼油腥味	7~10
	酸奶香气寡淡, 略有鱼油腥味	4~6
	鱼油腥味明显, 掩盖了酸奶香气	0~3
色泽	白亮或淡黄色, 颜色均匀, 光泽诱人	7~10
	白色或淡黄色, 颜色均匀, 无光泽	4~6
	有异色, 颜色不均匀, 无光泽	0~3
口感滋味	口感细腻, 酸甜适中, 无腥味	7~10
	口感较细腻, 酸甜适中, 有轻微腥味	4~6
	口感粗糙, 过酸或过甜, 有强烈腥味	0~3
组织状态	无乳清析出、均匀细腻	7~10
	有轻微乳清析出、均匀细腻	4~6
	大量乳清析出、分层明显	0~3
总体接受度	非常喜欢	7~10
	比较喜欢	4~6
	不喜欢	0~3

1.3.5 鱼油酸奶 pH 的测定

使用 pH 计对酸奶样品的 pH 进行测定。

1.3.6 鱼油酸奶持水性的测定

称量空离心管的质量记为 W_0 。将 10 g 酸奶置于离心管中, 并记质量为 W_1 。离心(4℃、3000 r/min、15 min), 静置 10 min, 使用针头吸去清液, 记质量为 W_2 ^[21], 持水力计算公式见式(1)。

$$\text{持水力}/\% = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.7 鱼油酸奶质构特性的测定

使用 TA-XT Plus 质构仪检测酸奶的硬度。选用 36 R 探头; 参数为: 测试速度: 前 10 mm/s, 中 1 mm/s, 后 10 mm/s; 下降距离为 40 mm, 表面触发力 $5 \times g$ ^[22]。

1.3.8 鱼油酸奶流变性的测定

采用 MCR302 界面流变仪。参数为: 酸奶表观黏度随剪切时间变化的测定: 温度: 4℃, 恒定转速: 300 r/min, 对 90 个连续数据点进行 360 s 测试; 酸奶应变扫描: 温度: 4℃, 扫描频率: 1 Hz, 应变范围: 0.01%~100.00%, 收集 21 个数据点; 酸奶温度扫描: 剪切速率: 50 s^{-1} , 温度: 4~30℃, 升高速率: 3℃/min, 采集 24 个数据点^[23]。

1.3.9 鱼油酸奶 DPPH 自由基清除活性的测定

将 10、15、0.5 mL 的酸奶、乙醇、浓盐酸混合, 涡旋后离心(4℃, 3000 r/min, 10 min), 静置 10 min, 取清液进行检测^[24]。

将等量清液和 DPPH 乙醇溶液(0.1 mol/L)混合, 涡旋, 避光孵育(25℃, 30 min), 测定吸光值(517 nm), 乙醇替代清液作为空白对照, 计算公式如式(2)所示^[25]。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{\text{实验组吸光度}}{\text{空白组吸光度}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

1.3.10 鱼油酸奶中脂质氧化的测定

对 SHANTHA^[26]描述的方法进行完善, 检测酸奶中脂质一次氧化产物过氧化氢的量。将样品(0.3 mL)与异辛烷/异丙醇(3:1, V/V; 1.5 mL)混合。涡旋 10 s, 间隔 20 s 后重复涡旋, 重复 3 次。通过在 2000×g 下离心 2 min (4℃)分离水相, 200 μL 清液与 2.8 mL 甲醇-丁醇(2:1, V/V)混合。每个样品中加入 Fe^{2+} 溶液(50 μL)与硫氰酸铵溶液(50 μL, 3.94 mol/L), 涡旋, 室温避光孵育 20 min。于 510 nm 处测量吸光度。 Fe^{2+} 溶液是由新鲜制备的 FeSO_4 (1 mL, 0.144 mol/L)和 BaCl_2 (1 mL, 0.132 mol/L)的混合溶液离心(2000×g, 2 min)后获得。使用过氧化氢异丙苯来制作标准曲线。

1.3.11 鱼油酸奶中 DHA 保留率的测定

参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定酸奶中 DHA 的含量。

1.4 数据处理

每组实验进行 3 次重复, 结果以“平均值±标准偏差”表示。使用 SPSS 25 软件进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)分析, 使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 芝麻酚对鱼油酸奶感官评价的影响

由表 3 可知, 对照酸奶的气味、色泽、口感滋味、组

表3 不同鱼油酸奶的感官评价
Table 3 Sensory evaluation of different fish oil yogurts

项目	气味	色泽	口感滋味	组织状态	总体接受度
对照酸奶	8.91±0.62 ^a	8.19±0.52 ^a	8.43±0.59 ^a	8.21±0.62 ^a	8.42±0.56 ^a
5%鱼油酸奶	5.12±0.55 ^c	7.91±0.44 ^a	6.35±0.38 ^c	6.89±0.46 ^c	6.15±0.45 ^c
5%芝麻酚鱼油酸奶	6.97±0.43 ^b	7.93±0.66 ^a	7.26±0.46 ^b	7.53±0.49 ^b	7.36±0.68 ^b
10%鱼油酸奶	3.58±0.37 ^d	7.16±0.37 ^b	5.47±0.41 ^d	6.06±0.71 ^d	4.06±0.35 ^d
10%芝麻酚鱼油酸奶	5.27±0.21 ^c	7.88±0.63 ^a	6.55±0.53 ^c	6.94±0.32 ^c	5.85±0.34 ^c

注: 同列不同小写字母表示不同样品之间存在显著性差异($P<0.05$), 下同。

织状态和总体接受度都表现出最高的评价。5%鱼油酸奶与10%鱼油酸奶的气味、口感滋味、组织状态和总体接受度的评价都明显低于对照酸奶, 鱼油氧化产生的鱼腥味会对鱼油酸奶的气味、口感滋味造成负面影响, 降低消费者对鱼油酸奶的可接受程度。5%芝麻酚鱼油酸奶和10%芝麻酚鱼油酸奶的气味、口感滋味均明显优于5%鱼油酸奶与10%鱼油酸奶, 说明芝麻酚可以改善鱼油给酸奶带来的负面影响, 包括降低鱼腥味、口感滋味带来的不良影响。此外, 芝麻酚的加入使得鱼油酸奶的组织状态有所改善, 5%芝麻酚鱼油酸奶均匀细腻且乳清析出轻微, 总体接受度也明显优于5%鱼油酸奶。然而, 芝麻酚不能完全掩盖鱼腥味, 该情况还有待进一步改善, 以提高鱼油酸奶的总体接受度。

2.2 芝麻酚对鱼油酸奶 pH 的影响

酸奶的酸度与风味及口感密切相关, 更能直接反映发酵情况。由表4可知, 与对照酸奶相比, 5%鱼油酸奶以及10%鱼油酸奶的pH并没有显著变化。5%芝麻酚鱼油酸奶与5%鱼油乳液的pH相比也没有显著差别。酸奶的pH由发酵过程中乳酸菌的产酸决定, 所以鱼油乳液和芝麻酚的添加对酸奶发酵时乳酸菌的发育繁殖和产酸没有显著影响。类似的研究发现, 添加适量茶多酚没有显著抑制酸奶发酵时菌株的发酵和产酸^[9]。但是与10%鱼油酸奶相比, 10%芝麻酚鱼油酸奶的pH显著提高, 这可能是过量的芝麻酚抑制了菌株发酵。

2.3 芝麻酚对鱼油酸奶持水力的影响

酸奶持水力取决于其内部组织形态, 受到酸奶中蛋白与其他物质之间的相互作用影响^[27]。由表4可知, 与对照酸奶相比, 5%鱼油酸奶与10%鱼油酸奶的持水力都显著升高, 且都在70%以上。鱼油酸奶持水能力的大幅度提高可能源于鱼油小液滴与凝胶网络中蛋白相互作用增强了其持水性能^[28]。也有可能鱼油乳液中乳清分离的加入增强了原有蛋白网络结构的保水能力有关^[29]。持水性的提高可以改善酸奶的品质, 抑制酸奶品质恶化和表面乳清析出从而延长货架期。与10%鱼油酸奶相比, 10%芝麻酚鱼油酸奶的持水力显著下降。类似研究发现, 过量的儿茶素可能会促进蛋白质的聚集继而降低酸奶网络结构的保水能力^[30]。此外, 5%芝麻酚鱼油酸奶的持水力与5%鱼油酸奶没有

表4 不同鱼油酸奶的 pH、持水力
Table 4 pH and water-holding of different fish oil yogurts

样品	pH	持水性/%	硬度/g
对照酸奶	4.30±0.02 ^b	62.27±0.85 ^d	87.66±1.69 ^a
5%鱼油酸奶	4.33±0.03 ^{ab}	72.58±0.67 ^c	77.27±1.10 ^b
5%芝麻酚鱼油酸奶	4.34±0.01 ^{ab}	71.64±1.10 ^c	85.38±1.95 ^a
10%鱼油酸奶	4.31±0.02 ^b	86.81±0.90 ^a	77.37±1.16 ^b
10%芝麻酚鱼油酸奶	4.35±0.01 ^a	78.66±1.10 ^b	68.30±2.05 ^c

显著差异, 在贮藏时没有出现乳清析出等品质恶化问题, 说明300 μmol/L芝麻酚的加入没有破坏酸奶的贮藏稳定性。

2.4 芝麻酚对鱼油酸奶质构特性的影响

分析质构特性可以得到酸奶的食用感观、结构状态和品质稳定性。由表5可知, 5%鱼油酸奶和10%鱼油酸奶的硬度、黏附性、弹性、内聚性、胶着性与对照酸奶相比显著下降, 说明鱼油乳液的添加降低了酸奶的硬度、黏附性、弹性、内聚性、胶着性。与5%鱼油酸奶相比, 5%芝麻酚鱼油酸奶的硬度、黏附性和胶着性显著增加, 表明300 μmol/L芝麻酚的加入能够提升鱼油酸奶的硬度、黏附性和胶着性。但是10%芝麻酚鱼油酸奶的硬度、胶着性与10%鱼油酸奶相比却明显降低。过量的芝麻酚会促使蛋白凝结成大分子集团, 破坏酸奶内部网络结构的均匀性来降低硬度^[31]。在生产与售卖时高硬度酸奶受到消费者的排斥, 因为感官品质较差和黏附容器影响食用体验。所以加入适量芝麻酚可以柔化酸奶口感提升食用体验。

2.5 芝麻酚对鱼油酸奶流变特性的影响

2.5.1 芝麻酚对鱼油酸奶在4℃恒速条件下表观黏度变化的影响

由图1可知, 所有酸奶的表观黏度值均随着时间的延长而下降。在相同时间点, 5%鱼油酸奶和10%鱼油酸奶的表观黏度值都小于对照酸奶, 表明鱼油的添加降低了酸奶的黏度。与鱼油酸奶相比, 芝麻酚鱼油酸奶的黏度更大, 说明芝麻酚的添加改善了鱼油酸奶的表观黏度值, 这可能源于芝麻酚与蛋白质之间的氢键和疏水相互作用。5组酸奶样品中5%芝麻酚鱼油酸奶黏度的变化量最小, 这表明添加300 μmol/L芝麻酚可以使酸奶凝胶体系趋于稳定。

表 5 不同鱼油酸奶的质构特性
Table 5 Textural properties of different fish oil yogurts

样品	硬度	黏附性	弹性	内聚性	胶着性
对照酸奶	87.66±1.69 ^a	-117.28±5.51 ^a	0.96±0.08 ^a	0.87±0.06 ^a	75.76±4.51 ^a
5%鱼油酸奶	77.27±1.10 ^b	-80.04±2.65 ^c	0.93±0.05 ^b	0.83±0.05 ^b	63.80±2.11 ^c
5%芝麻酚鱼油酸奶	85.38±1.95 ^a	-95.43±4.89 ^b	0.92±0.07 ^b	0.80±0.07 ^c	68.22±3.31 ^b
10%鱼油酸奶	77.37±1.16 ^b	-53.08±3.80 ^d	0.92±0.04 ^b	0.83±0.04 ^b	64.70±2.56 ^{bc}
10%芝麻酚鱼油酸奶	68.30±2.05 ^c	-53.53±3.16 ^d	0.93±0.06 ^b	0.84±0.05 ^b	57.43±3.76 ^d

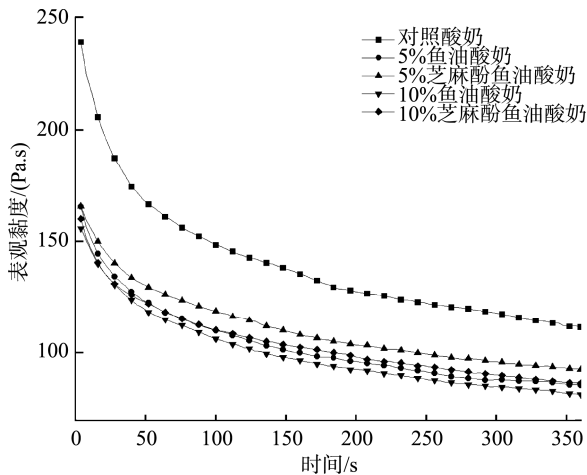


图 1 4°C恒速条件下不同鱼油酸奶表观黏度随时间变化的曲线
Fig.1 Curves of apparent viscosity of different fish oil yogurts with time under constant speed condition at 4°C

2.5.2 芝麻酚对鱼油酸奶应变扫描结果的影响

各组酸奶应变扫描结果如图 2 所示。在较低的应变频率下，所有酸奶的储能模量(G')>损耗模量(G'')，并且储能模量(G')和损耗模量(G'')的数值比较平稳，说明在低频应变内无论是鱼油酸奶还是芝麻酚鱼油酸奶的网络结构都没有受到负面影响，具备明显的弹性和固体特征；但是，随着应变频率的升高，储能模量(G')下降速率加快并且开始低于损耗模量(G'')，在较高频应变内，酸奶由固体状态转变为液体状态。图 5 中对照酸奶的 G' 和 G'' 最高，芝麻酚鱼油酸奶 G' 和 G'' 高于鱼油酸奶。这表明鱼油乳液的添加会破坏对照酸奶网络结构的稳定性能。相反，添加芝麻酚能够加强鱼油酸奶的网络结构并使其愈加稳定，因为酚会促进蛋白质分子间的共价交联从而优化酸奶的组织状态^[32]。

2.5.3 芝麻酚对鱼油酸奶在 4~30°C 恒速升温条件下表观黏度变化的影响

采用温度扫描对酸奶样品进行测试，分析温度变化对酸奶内部组织结构及品质稳定性的影响，为研究酸奶在生产、运输和售卖过程中对温度的接受性提供参考依据。如图 3 所示，对照酸奶的表观黏度始终高于鱼油酸奶，鱼油酸奶的表观黏度却低于芝麻酚鱼油酸奶，这种趋势与酸奶恒温恒速条件下表观黏度的扫描一致。根据酸奶表观黏度伴随温度升高而减小的情况可知，芝麻酚的加入减小了

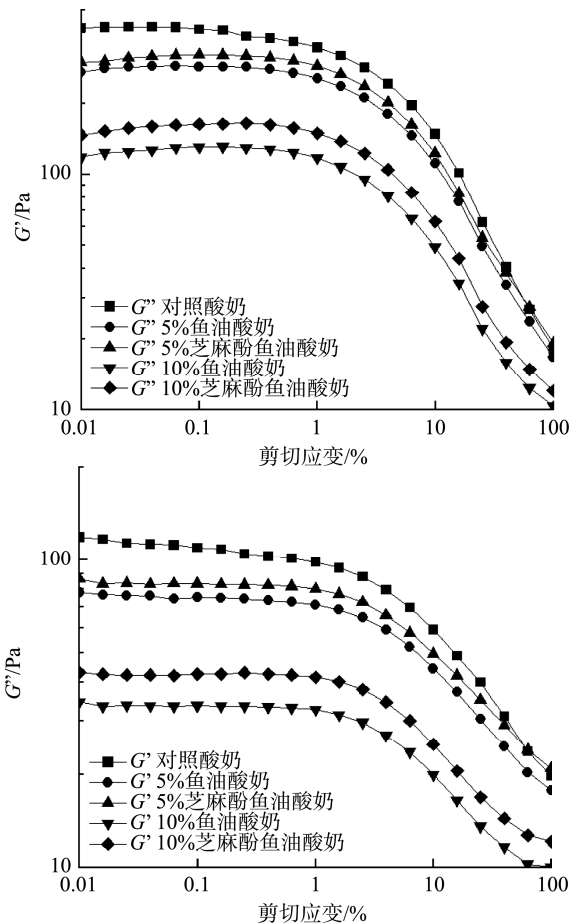


图 2 4°C 恒定频率条件下不同鱼油酸奶的储能模量(G')和损耗模量(G'')的变化曲线
Fig.2 Variation curves of energy storage modulus (G') and loss modulus (G'') of different fish oil yogurts at constant frequency of 4°C

鱼油酸奶表观黏度随温度升高而下降的程度。在相同温度时，芝麻酚鱼油酸奶的表观黏度均高于鱼油酸奶，说明芝麻酚能够增强酸奶变温时维持弹性性状的能力。

2.6 芝麻酚对鱼油酸奶 DPPH 自由基清除活性的影响

由表 6 可知，鱼油的添加对对照酸奶的抗氧化活性没有显著性影响，而芝麻酚鱼油乳液的抗氧化活性与鱼油酸奶相比显著提高，该结果表明芝麻酚显著加强酸奶 DPPH

自由基清除能力。实验结果表明, 5%芝麻酚鱼油酸奶具有最好的抗氧化能力, 其 DPPH 自由基清除能力强于 10%芝麻酚鱼油酸奶。10%芝麻酚鱼油酸奶的芝麻酚和鱼油含量都是 5%芝麻酚鱼油酸奶的 2 倍, 10%芝麻酚鱼油酸奶的鱼油在酸奶发酵过程中氧化程度高, 10%芝麻酚鱼油酸奶的芝麻酚在抑制鱼油氧化后供氢能力下降快, 导致 10%芝麻酚鱼油酸奶的抗氧化能力低于 5%芝麻酚鱼油酸奶。有关研究发现, 芝麻酚不仅在猪油中清除 DPPH 自由基的能力高于生育酚^[14], 而且在亚麻籽油和葵花籽油中芝麻酚的抗氧化活性高于天然抗氧化剂芝麻素^[15]。

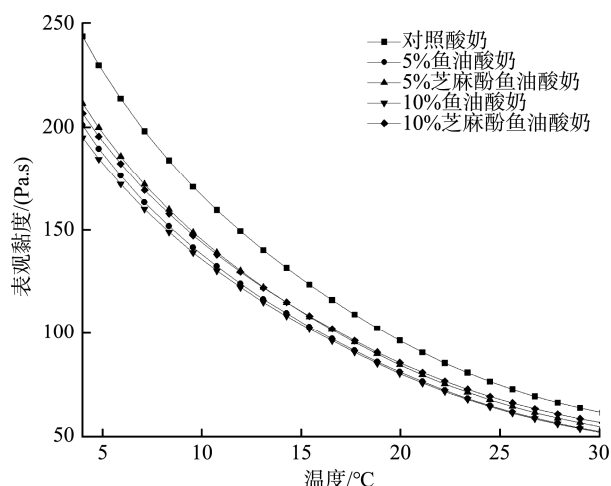


图 3 不同鱼油酸奶表观黏度在 4~30°C 的变化曲线
Fig.3 Variation curves of apparent viscosity of different fish oil yogurts from 4 to 30°C

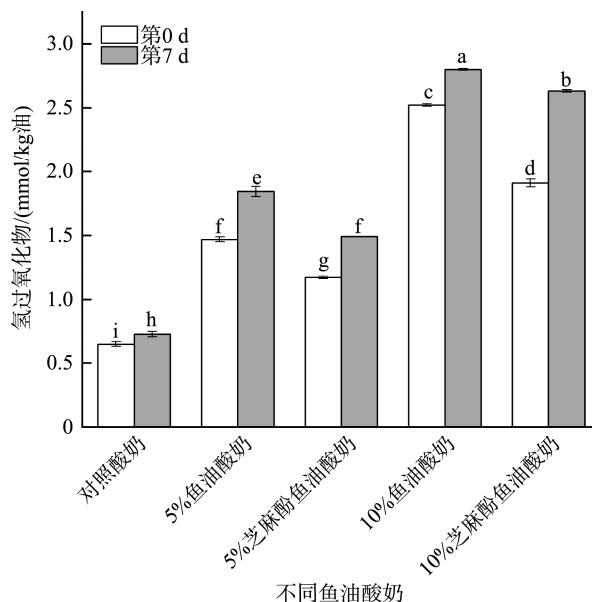
表 6 不同鱼油酸奶的 DPPH 自由基清除率
Table 6 DPPH free radical scavenging rates of different fish oil yogurts

样品	DPPH 自由基清除率/%
对照酸奶	58.48±1.02 ^e
5%鱼油酸奶	60.58±1.10 ^e
5%芝麻酚鱼油酸奶	68.67±1.96 ^a
10%鱼油酸奶	60.75±2.15 ^e
10%芝麻酚鱼油酸奶	64.53±1.91 ^b

2.7 芝麻酚对鱼油酸奶脂质氧化的影响

图 4 为酸奶脂质一次氧化产物氢过氧化物在 4°C 储存 7 d 的变化。7 d 后, 所有酸奶的氢过氧化物值都增大。5%鱼油酸奶和 10%鱼油酸奶的氢过氧化物值显著大于对照酸奶, 并与鱼油乳液含量呈正相关。其中 5%芝麻酚鱼油酸奶和 10%芝麻酚鱼油酸奶的氢过氧化物值分别显著小于 5%鱼油酸奶和 10%鱼油酸奶。说明鱼油的添加加快了酸奶的脂质氧化, 但是芝麻酚的添加却提高了鱼油酸奶的氧化稳定性。这与 DU 等^[33]的研究结果一致, 白藜芦醇等 6

种酚类的加入显著增强鱼油中脂质的氧化稳定性。芝麻酚优异的抗氧化性能源于其独特的结构和化学反应活性, 其苯并二氧基上的酚基具有与酚羟基同样强大的抗氧化清除能力^[34]。这使得芝麻酚可以有效的清除过氧自由基从而中断脂质氧化链^[16]。



注: 不同小写字母表示不同样品之间存在显著性差异(P<0.05)。
图 4 不同鱼油酸奶储存 7 d 前后的过氧化氢值
Fig.4 Values of hydroperoxides in different fish oil yogurts before and after 7 days of storage

2.8 芝麻酚对鱼油酸奶 DHA 保留率的影响

表 7 为鱼油酸奶中 DHA 在 4°C 储存 7 d 后的保留率。贮藏 7 d 后, 5%芝麻酚鱼油酸奶和 10%芝麻酚鱼油酸奶 DHA 的保留率分别显著高于 5%鱼油酸奶和 10%鱼油酸奶, 其中 5%芝麻酚鱼油酸奶的 DHA 保留率最高, 为 81.19%。综上所述, 芝麻酚的加入显著提高了酸奶中 DHA 的保留率。这归因于芝麻酚赋予鱼油酸奶更好的自由基清除活性, 进而抑制了酸奶中脂质的氧化。

表 7 不同鱼油酸奶的 DHA 保留率
Table 7 DHA retention rates of different fish oil yogurts

样品	DHA 保留率/%
5%鱼油酸奶	69.32±0.45 ^d
5%芝麻酚鱼油酸奶	81.19±0.17 ^a
10%鱼油酸奶	72.93±2.14 ^e
10%芝麻酚鱼油酸奶	76.94±0.54 ^b

3 结 论

本研究利用乳液载体将鱼油添加至全脂牛乳中发

酵制备成营养强化型酸奶,提高了酸奶 DHA 含量和市场竞争能力。结果表明,鱼油乳液的添加会降低对照酸奶的品质,同时促进酸奶中脂质氧化。300 $\mu\text{mol/L}$ 芝麻酚的添加不仅改善了鱼油酸奶的品质(感官评价、持水力、硬度、4 $^{\circ}\text{C}$ 恒温黏度、储能模量、损耗模量和 4~30 $^{\circ}\text{C}$ 变温黏度),还提高了酸奶的氧化稳定性(抑制油脂氧化,提高抗氧化活性和 DHA 保留率),因此 300 $\mu\text{mol/L}$ 芝麻酚可提高鱼油酸奶的氧化稳定性,保证酸奶的营养价值和品质。芝麻酚鱼油酸奶的开发可为酸奶新产品的开发提供理论参考。

参考文献

- [1] GUMUS CE, GHARIBZAHEDI SMT. Yogurts supplemented with lipid emulsions rich in omega-3 fatty acids: New insights into the fortification, microencapsulation, quality properties, and health-promoting effects [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 110: 267–279.
- [2] DEREWIAKA D, STEPNOWSKA N, BRYŚ J, *et al.* Chia seed oil as an additive to yogurt [J]. Grasas Aceites, 2019, 70(2): e302.
- [3] MATOS J, AFONSO C, CARDOSO C, *et al.* Yogurt enriched with isochrysis galbana: An innovative functional food [J]. Foods, 2021, 10(7): 1458.
- [4] GHORBANZADE T, AKHAVAN-MAHDAVI S, KHARAZMI MS, *et al.* Loading of fish oil into beta-cyclodextrin nanocomplexes for the production of a functional yogurt [J]. Food Chem X, 2022, 15: 100406.
- [5] TUREK K, WSZOLEK M. Comparative study of walnut and *Camelina sativa* oil as a functional components for the unsaturated fatty acids and conjugated linoleic acid enrichment of kefir [J]. LWT Food Sci Technol, 2021, 147: 111681.
- [6] TEREUCAN G, ERCOLI S, CORNEJO P, *et al.* Stability of antioxidant compounds and activities of a natural dye from coloured-flesh potatoes in dairy foods [J]. LWT Food Sci Technol, 2021, 144: 111252.
- [7] TRIGUEROS L, WOJDYLO A, SENDRA E. Antioxidant activity and protein-polyphenol interactions in a pomegranate (*Punica granatum* L.) yogurt [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(27): 6417–6425.
- [8] LIU D, LV XX. Effect of blueberry flower pulp on sensory, physicochemical properties, lactic acid bacteria, and antioxidant activity of set-type yogurt during refrigeration [J]. J Food Process Pres, 2019, 43(1): e13856.
- [9] RAHMANI F, GANDOMI H, NOORI N, *et al.* Microbial, physicochemical and functional properties of probiotic yogurt containing *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium bifidum* enriched by green tea aqueous extract [J]. Food Sci Nutr, 2021, 9(10): 5536–5545.
- [10] VENUGOPALAN VK, GOPAKUMAR L R, KUMARAN A K, *et al.* Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems [J]. Foods, 2021, 10(7): 1566.
- [11] GUADARRAMA-FLORES B, MATENCIO A, NAVARRO-ORCAJADA S, *et al.* Development of healthy milk and yogurt products for reducing metabolic diseases using cyclodextrin and omega-3 fatty acids from fish oil [J]. Food Funct, 2022, 13(10): 5528–5535.
- [12] SHAHPARAST Y, ESKANDANI M, RAJAEI A, *et al.* Preparation, physicochemical characterization and oxidative stability of omega-3 fish oil/ α -tocopherol-co-loaded nanostructured lipidic carriers [J]. Adv Pharm Bull, 2019, 9(3): 393.
- [13] CAROCHO M, BARREIRO MF, MORALES P, *et al.* Adding molecules to food, pros and cons: A review on synthetic and natural food additives [J]. Compr Rev Food Sci, 2014, 13(4): 377–399.
- [14] YEO JD, JEONG MK, PARK CU, *et al.* Comparing antioxidant effectiveness of natural and synthetic free radical scavengers in thermally-oxidized lard using DPPH method [J]. J Food Sci, 2010, 75(3): 258–262.
- [15] HADEEL SY, KHALIDA SA, WALSH M. Antioxidant activity of sesame seed lignans in sunflower and flaxseed oils [J]. Food Res, 2019, 4(3): 612–622.
- [16] TOORANI MR, FARHOOSH R, GOLMAKANI M, *et al.* Antioxidant activity and mechanism of action of sesamol in triacylglycerols and fatty acid methyl esters of sesame, olive, and canola oils [J]. LWT Food Sci Technol, 2019, 103: 271–278.
- [17] HONG S, JO S, KIM MJ, *et al.* Addition of sesamol increases the oxidative stability of beeswax organogels and beef tallow matrix under UV light irradiation and thermal oxidation [J]. J Food Sci, 2019, 84(5): 971–979.
- [18] WANG X, YU K, CHENG C, *et al.* Impact of sesame lignan on physical and oxidative stability of flaxseed oil-in-water emulsion [J]. Oil Crop Sci, 2019, 4(4): 254–266.
- [19] CHENG C, YU X, MCCLEMENTS DJ, *et al.* Effect of flaxseed polyphenols on physical stability and oxidative stability of flaxseed oil-in-water nanoemulsions [J]. Food Chem, 2019, 301: 125207.
- [20] DU H, WANG X, YANG H, *et al.* Regulation on the quality of yogurt by phenolic fraction of mulberry pomace supplemented before and after fermentation [J]. Food Control, 2023, 144: 109333.
- [21] BASIRI S, HAIDARY N, SHEKARFOROUSH SS, *et al.* Flaxseed mucilage: A natural stabilizer in stirred yogurt [J]. Carbohydr Polym, 2018, 187: 59–65.
- [22] WANG X, KRISTO E, LAPOINTE G. Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 100: 105453.
- [23] KRISTO E, MIAO Z, CORREDIG M. The role of exopolysaccharide produced by *Lactococcus lactis* subsp. cremoris in structure formation and recovery of acid milk gels [J]. Int Dairy J, 2011, 21(9): 656–662.
- [24] HAMED AM, TAHA SH, DARWISH AA, *et al.* Antioxidant activity and some quality characteristics of buffalo yoghurt fortified with peanut skin extract powder [J]. J Food Sci Technol Mys, 2021, 58(6): 2431–2440.
- [25] 马荣琨, 李望铭. 奇亚籽希腊式酸奶的工艺优化研究[J]. 食品安全质

- 量检测学报, 2022, 13(2): 388–394.
- MA RK, LI WM. Study on process optimization of chia seed Greek-style yogurt [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(2): 388–394.
- [26] SHANTHA N. Rapid, sensitive, iron-based spectrophotometric methods for determination of peroxide values of food lipids [J]. *J AOAC Int*, 1994, 77(2): 421–424.
- [27] KWON HC, BAE H, SEO HG, *et al.* Short communication: Chia seed extract enhances physicochemical and antioxidant properties of yogurt [J]. *J Dairy Sci*, 2019, 102(6): 4870–4876.
- [28] ZHENG S, HE Z, HE L, *et al.* Influence of adding *Perilla* seed oil on potato blueberry yogurt quality during storage at 4°C [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2022, 168: 113921.
- [29] HASHIM MA, NADTOCHII LA, MURADOVA MB, *et al.* Non-fat yogurt fortified with whey protein isolate: Physicochemical, rheological, and microstructural properties [J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1762.
- [30] NASSER AAS, JAVED MK, AJAMALUDDIN M, *et al.* Molecular interaction of tea catechin with bovine β -lactoglobulin: A spectroscopic and in silico studies [J]. *Saudi Pharm J*, 2020, 28(3): 238–245.
- [31] MOUSAVI M, HESHMATI A, DARAEI GA, *et al.* Texture and sensory characterization of functional yogurt supplemented with flaxseed during cold storage [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(3): 907–917.
- [32] DURMUS N, CAPANOGLU E, KILIC-AKYILMAZ M. Activity and bioaccessibility of antioxidants in yoghurt enriched with black mulberry as affected by fermentation and stage of fruit addition [J]. *Int Dairy J*, 2021, 117: 105018.
- [33] DU H, WANG X, YANG H, *et al.* Changes of phenolic profile and antioxidant activity during cold storage of functional flavored yogurt supplemented with mulberry pomace [J]. *Food Control*, 2022, 132: 108554.
- [34] JAYARAJ P, NARASIMHULU CA, RAJAGOPALAN S, *et al.* Sesamol: A powerful functional food ingredient from sesame oil for cardioprotection [J]. *Food Funct*, 2020, 11(2): 1198–210.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



高智辉, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 13894010201@163.com



董绪燕, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能脂质研究与利用。

E-mail: dongxueyan@qau.edu.cn