

# 椰子油基酸奶的品质及体外消化特性研究

王树树<sup>1</sup>, 徐青青<sup>1</sup>, 陈莹<sup>1</sup>, 刘莹<sup>1</sup>, 王卫飞<sup>2</sup>, 王永华<sup>1,3</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广州 510640; 2. 广东省农业科学院蚕业与农产品研究所, 广州 510640; 3. 广东优酶生物制造研究院有限公司, 广东佛山 528226)

**摘要:**为开发新型酸奶,给消费者提供更多的选择,以脱脂奶粉、水、椰子油为原料,经高速剪切、高压均质制备富含椰子油的复原乳,再经灭菌、冷却、接种、发酵后制得椰子油基酸奶。探究了椰子油添加量(0%、2%、4%、6%、8%、10%和12%)对复原乳粒径的影响,对酸奶酸度、色度、持水性、感官特性、质构特性的影响,并研究了感官得分最高的椰子油基酸奶的消化特性。结果表明:椰子油添加量在2%~8%时,复原乳的平均粒径和粒径分布均无显著性差异;椰子油添加量为6%时,酸奶感官评分最高,为89.1分,此时酸奶的持水力为87.1%、pH为4.25、色度 $L^*$ 为89.42;体外肠消化模拟实验证明,椰子油基酸奶(椰子油添加量为6%)的甘油三酯水解率及脂肪酸释放率分别比相同含油量的传统酸奶高25.99%及13.85%。综上,添加椰子油有利于酸奶的消化吸收,且椰子油添加量为6%时制得的酸奶整体品质最好。

**关键词:**椰子油;酸奶;感官评定;质构特性;体外消化

中图分类号:TS225.1;TS201.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)11-0141-06

## Quality and in vitro digestive properties of coconut oil – based yogurt

WANG Shushu<sup>1</sup>, XU Qingqing<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>, LIU Xuan<sup>1</sup>,  
WANG Weifei<sup>2</sup>, WANG Yonghua<sup>1,3</sup>

(1. College of Food Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Youmei Institute of Intelligent Bio – manufacturing, Foshan 528226, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to develop a new type of yogurt and provide consumers with more choices, reconstituted milk rich in coconut oil was prepared by high – speed shearing and high – pressure homogenization with skim milk powder, water and coconut oil as raw materials, and then coconut oil – based yogurt was obtained after the sterilization, cooling, inoculation and fermentation of the reconstituted milk. The effect of coconut oil amount (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% and 12%) on the particle size of reconstituted milk was explored. Furthermore, the effects of coconut oil amount on the acidity, color, water holding capacity, sensory properties and texture properties of yogurt were investigated. The digestive properties of the coconut oil – based yogurt with the highest sensory scores were also explored. The results showed that when the amount of coconut oil was added at 2% – 8%, there was no significant difference in the average particle size and particle size distribution of reconstituted milk. Moreover, the

sensory score of the yogurt showed the best performance (with score of 89.1) when the oil amount was 6%. The water holding capacity of the yogurt with best performance was 87.1%, the pH was 4.25, and the brightness  $L^*$  was 89.42. In vitro intestinal digestion showed that the triglyceride hydrolysis rate and fatty acid release rate of coconut oil – based yogurt (coconut oil

收稿日期:2022-07-07;修回日期:2023-07-03

基金项目:国家重点研发项目(2019YFD1002403);国家自然科学基金(31930084);国家杰出青年科学基金(31725022);佛山市南海区人才创新创业团队(201811070001)

作者简介:王树树(1997),男,硕士研究生,研究方向为油脂化学(E-mail)838284499@qq.com。

通信作者:王永华,教授(E-mail)yonghw@scut.edu.cn。

amount 6%) were 25.99% and 13.85% higher than those of traditional yogurt with the same oil content, respectively. Overall, the addition of coconut oil facilitates the digestion and absorption of the yogurt and the overall quality of the yogurt is the best when the coconut oil amount is 6%.

**Key words:** coconut oil; yogurt; sensory evaluation; texture property; in vitro digestion

酸奶是以牛乳为原料,经乳酸菌发酵制成的一种牛乳制品,它不仅保留了牛乳中的营养成分,还能够满足乳糖不耐症人群的需求<sup>[1]</sup>。酸奶因富含益生菌、利于消化等优势,备受人们的喜爱。油脂是酸奶中的主要营养物质之一,可为人体提供部分能量。同时,油脂也是酸奶风味物质的重要来源,在微生物及相关酶的作用下,油脂分解为脂肪酸、醛、酮等物质,赋予酸奶独特的风味<sup>[2]</sup>。此外,酸奶中的油脂也对酸奶凝胶网络的形成具有重要影响<sup>[3]</sup>。因此,研究油脂对酸奶品质的影响具有积极的意义。

乳脂中富含长链脂肪酸(LCFA),占总脂肪酸含量的90%左右<sup>[4]</sup>。椰子油中富含大量中链脂肪酸(MCFA),主要为月桂酸。与LCFA相比,MCFA具有快速供能、利于吸收的优势。MCFA被小肠上皮细胞吸收后,不需要经过淋巴系统,直接进入门静脉与血浆白蛋白结合转运至肝脏。同时MCFA不需要借助肉毒碱的转运直接进入线粒体实现快速氧化供能<sup>[5]</sup>。椰子油是从椰子中提取的植物油,具有清淡的椰香。在酸奶发酵的过程中添加椰子油,对促进酸奶中油脂的消化与吸收、赋予酸奶新的风味具有积极的影响。

本研究用椰子油替代牛乳中的油脂,考察了不同椰子油添加量对椰子油复原乳粒径的影响,确定了标准化复原乳的合适椰子油添加量,同时,探究了不同椰子油添加量对发酵酸奶酸度、色度、持水性、感官特性、质构特性的影响,并通过静态体外消化模拟,探究了椰子油基酸奶的脂质消化释放规律,以期开发一款新型油脂添加的酸奶,给消费者提供更多的选择。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

精炼椰子油、安佳脱脂奶粉、全脂牛奶,购自当地超市;保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌,山东中科嘉亿生物工程有限公司;胃蛋白酶、胰脂肪酶,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;正己烷、异丙醇、甲酸均为色谱纯,天津科密欧试剂有限公司;无水硫酸钠,上海麦克林生化试剂有限公司;盐酸,广州化学试剂厂。

#### 1.1.2 仪器与设备

BS224S分析天平,德国赛多利斯集团;FJ200-S数显高速分散均质机,上海索映仪器设备有限公司;AH-NANO纳米制剂高压均质机,安拓思纳米技术(苏州)有限公司;LS-POP(9)激光粒度分析仪,珠海欧美克仪器有限公司;电热鼓风干燥箱,中仪国科(北京)科技有限公司;THZ-82A水浴恒温摇床,常州澳华仪器有限公司;H1850R高速台式冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;质构仪,上海保圣实业有限公司;pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;CR-400色彩色差计,柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;高效液相色谱仪(配备示差折光检测器),美国Waters公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 复原乳的制备

将脱脂奶粉与纯水以质量比1:9混合复原为脱脂牛奶,然后按照质量比分别向脱脂牛奶中加入0%、2%、4%、6%、8%、10%、12%的椰子油,在高速分散均质机中以17 000 r/min剪切3 min,再用高压均质机在30 MPa下均质3次,制成稳定的复原乳。

#### 1.2.2 酸奶的制备

将复原乳灌装于250 mL锥形瓶中→灭菌(95℃下灭菌5 min)→冷却(冷却至室温)→接种2%菌粉(保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌比例为1:1)→恒温发酵(35℃下发酵7 h)→冷藏后熟(4℃下冷藏24 h)→成品。

#### 1.2.3 复原乳粒径测定

使用激光粒度分析仪,以纯水作为分散介质,在折光指数1.33、激光强度85%、进料泵速2 000 r/min条件下测定复原乳粒径。

#### 1.2.4 酸奶品质分析

##### 1.2.4.1 基本理化指标测定

酸度参照GB 5009.239—2016中的酚酞指示剂法测定;pH使用pH计测定;蛋白质含量参照GB 5009.5—2016中的凯氏定氮法测定。

##### 1.2.4.2 感官品质分析

参照GB 19302—2010并略作修改,对酸奶从色泽、风味、滋味、组织状态4个方面进行感官评定,评定标准见表1。

表1 酸奶感官评定标准

级别	色泽(10分)	风味(20分)	滋味(30分)	组织状态(40分)
一级	均匀乳白,有光泽(9~10分)	有酸奶或是椰子的香气,风味浓郁协调,无异味(16~20分)	具有酸奶特有的口感,酸度适中(26~30分)	组织细腻,质地均匀,黏度适中,无乳清析出(36~40分)
二级	颜色较浓,光泽度差(6~8分)	有酸奶或是椰子的香气,风味较淡,无异味(10~15分)	具有酸奶该有的口感,过酸(16~25分)	组织略不均匀细腻,偏黏或偏稀,少许乳清析出(31~35分)
三级	颜色较淡,光泽度差(3~5分)	风味不佳,有令人不愉快的异味(5~9分)	口感较差不协调,过酸(10~15分)	组织不均匀细腻,过黏或过稀,大量乳清析出(25~30分)

#### 1.2.4.3 质构特性测定

采用质构仪测定酸奶质构特性,测定参数:测试模式为全质构,探头为TA/36R,测前、测中、测后速度均为1 mm/s,触发力为4 gf。

#### 1.2.4.4 持水力测定

取10 g ( $m_0$ ) 酸奶于15 mL离心管内,在5 000 r/min下离心10 min,移除上清液并称量其质量( $m_1$ )。按式(1)计算酸奶持水力( $R$ )。

$$R = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.4.5 色度测定

使用色彩色差计以白色校准板( $L^* = 96.89$ ,  $a^* = -0.05$ ,  $b^* = 1.98$ )用作校准标准来测定酸奶的色度,以 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 表征,其中: $L^*$ 表示亮度, $a^* / -a^*$ 表示红/绿, $b^* / -b^*$ 表示黄/蓝。

#### 1.2.5 酸奶静态体外消化模拟

根据Brodkorb等<sup>[6]</sup>的方法配制基础液及各阶段消化液,依次进行口腔、胃、肠三阶段的体外消化模拟。口腔消化阶段:7.5 g酸奶与7.5 mL口腔模拟消化液(SSF)、12.5  $\mu$ L  $\text{CaCl}_2$ (浓度0.3 mol/L)溶液混合后,于37  $^{\circ}\text{C}$ 保温2 min。胃消化阶段:口腔消化结束后,加入15 mL胃模拟消化液(SGF)、2.5  $\mu$ L  $\text{CaCl}_2$ (浓度0.3 mol/L)溶液,用6 mol/L HCl溶液调节体系pH为3.00,加入12 mg胃蛋白酶,于37  $^{\circ}\text{C}$ 水浴摇床中以200 r/min的转速反应2 h。肠消化阶段:胃消化结束后,立即用5 mol/L NaOH溶液调节体系pH为7.0,再加入27 mL肠模拟消化液(SIF)、3 mL胆盐溶液(胆酸质量浓度100 mg/mL,以SIF溶解)、90 mg胰脂肪酶,于37  $^{\circ}\text{C}$ 水浴摇床中以200 r/min的转速反应2 h。

#### 1.2.6 酸奶消化产物中油脂的提取及组成分析

##### 1.2.6.1 油脂的提取

消化阶段按照规定时间取样,每次取样5 mL于15 mL离心管,立即加入200  $\mu$ L 4-溴苯硼酸甲醇溶液终止反应,然后加入1 mL盐酸溶液(浓度6 mol/L)、1 g五水硫酸钠、7 mL正己烷,振荡混匀后,于4 000 r/min转速下离心5 min,取上清液,氮吹浓缩至1 mL,过有机滤膜后待测。

#### 1.2.6.2 组成分析

采用HPLC分析油脂的组成。HPLC分析条件:Luna硅胶分离柱(4.6 mm  $\times$  250 mm, 5  $\mu$ m, Phenomenex Corporation, USA),流动相为正己烷、异丙醇、甲酸(体积比21:1:0.003),柱温箱温度30  $^{\circ}\text{C}$ 。

甘油三酯、脂肪酸、1,3-甘油二酯、1,2-甘油二酯、1-单甘酯、2-单甘酯的出峰时间分别为3.34、3.59、4.91、6.40、29.18、37.47 min。采用面积归一化法对各组分进行定量。

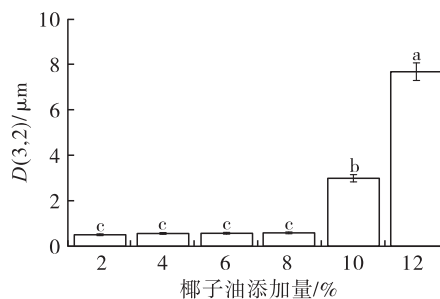
#### 1.2.7 数据分析

实验结果均为3次平行实验的平均值,均表示为“均值  $\pm$  标准差”。使用SPSS统计软件的方差分析(ANOVA)评估差异显著性( $p < 0.05$ ),采用OriginPro 2021软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 椰子油添加量对复原乳粒径的影响

椰子油添加量对复原乳粒径的影响如图1所示。



注:不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同

图1 椰子油添加量对复原乳粒径的影响

由图1可知,随着椰子油添加量的增大,复原乳平均粒径增大的速度先慢后快。当椰子油添加量小于或等于8%时,椰子油添加量每增加2%,复原乳平均粒径 $D(3,2)$ 增大幅度均在0.1  $\mu\text{m}$ 以下,且平均粒径 $D(3,2)$ 无显著性差异。随着椰子油添加量的进一步增加,复原乳平均粒径 $D(3,2)$ 显著增大,椰子油添加量为10%时,复原乳的平均粒径增大至3.03  $\mu\text{m}$ 。这是因为当椰子油添加量不超过8%时,体系中的乳蛋白能够充分覆盖在均质后的脂肪球表面形成较小

的脂肪球体系;而当椰子油添加量超过8%时,随着椰子油添加量的增加,乳蛋白的相对含量降低,不足以充分覆盖在油滴表面降低界面张力以形成更小的颗粒<sup>[7-8]</sup>,造成体系平均粒径显著增大。

不同椰子油添加量的复原乳粒径分布如表2所示。

表2 不同椰子油添加量的复原乳粒径分布

添加量/%	$D(10)/\mu\text{m}$	$D(50)/\mu\text{m}$	$D(90)/\mu\text{m}$	$D(97)/\mu\text{m}$
2	0.25 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.67 ± 0.00 <sup>c</sup>	1.68 ± 0.00 <sup>c</sup>	2.34 ± 0.01 <sup>c</sup>
4	0.27 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.74 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.68 ± 0.01 <sup>c</sup>	2.25 ± 0.03 <sup>c</sup>
6	0.26 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.76 ± 0.00 <sup>c</sup>	1.78 ± 0.02 <sup>c</sup>	2.51 ± 0.04 <sup>c</sup>
8	0.27 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.81 ± 0.02 <sup>c</sup>	1.96 ± 0.01 <sup>c</sup>	2.77 ± 0.02 <sup>c</sup>
10	1.27 ± 0.09 <sup>b</sup>	9.01 ± 0.10 <sup>b</sup>	28.90 ± 0.24 <sup>b</sup>	44.52 ± 2.05 <sup>b</sup>
12	32.19 ± 0.10 <sup>a</sup>	82.67 ± 1.25 <sup>a</sup>	183.19 ± 7.74 <sup>a</sup>	249.47 ± 23.69 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同

由表2可知,随着椰子油添加量的增加,复原乳的 $D(10)$ 、 $D(50)$ 、 $D(90)$ 、 $D(97)$ 总体表现出增大的趋势,且增大速度先慢后快。当椰子油添加量小于或等于8%时,复原乳的粒径分布无显著性差异,且复原乳体系中未出现很大的脂肪球颗粒,复原乳相对稳定。随着椰子油添加量的进一步增加,复原乳体系中乳脂肪球颗粒显著增大,根据Stockes方程式可知,此时由于乳液体系中粒径分布范围更广,具有更大的脂肪球颗粒,原料乳脂肪球颗粒更易上浮,复原乳体系更不稳定<sup>[9]</sup>。原料乳的粒径大小及稳定性对酸奶的品质有重要影响。因此,最终选择椰子油添加量为0~8%的复原乳进行酸奶的制备。

## 2.2 椰子油添加量对酸奶品质的影响

### 2.2.1 基本理化指标的变化

不同椰子油添加量酸奶的基本理化指标见表3。

表3 不同椰子油添加量酸奶的基本理化指标

添加量/%	pH	酸度/ (°)	蛋白质含量/ (g/100 g)
0	4.25 ± 0.01 <sup>a</sup>	71.74 ± 0.66 <sup>d</sup>	3.28 ± 0.07 <sup>a</sup>
2	4.22 ± 0.01 <sup>bc</sup>	72.72 ± 0.57 <sup>cd</sup>	3.27 ± 0.03 <sup>a</sup>
4	4.24 ± 0.01 <sup>ab</sup>	74.11 ± 0.35 <sup>b</sup>	3.22 ± 0.12 <sup>ab</sup>
6	4.25 ± 0.01 <sup>a</sup>	73.89 ± 0.66 <sup>bc</sup>	3.18 ± 0.05 <sup>ab</sup>
8	4.25 ± 0.01 <sup>a</sup>	75.52 ± 0.15 <sup>a</sup>	3.11 ± 0.03 <sup>b</sup>

由表3可知,不同椰子油添加量的复原乳经发酵后制备的酸奶,其pH基本维持在同一水平(4.22~4.25),酸度在71.74°~75.52°之间,蛋白质含量在3.11~3.28 g/100 g之间,酸度和蛋白质含量均符合GB 19302—2010对发酵乳的要求(酸度 $\geq 70.0^\circ$ ,蛋白质含量 $\geq 2.9$  g/100 g)。

### 2.2.2 感官品质的变化

椰子油添加量对酸奶感官品质的影响见表4。

表4 椰子油添加量对酸奶感官品质的影响

添加量/%	感官评价(分)				
	色泽	风味	滋味	组织状态	总分
0	7.2 ± 1.6 <sup>b</sup>	12.9 ± 2.9 <sup>b</sup>	26.5 ± 1.9 <sup>a</sup>	25.1 ± 3.0 <sup>d</sup>	71.7 ± 5.0 <sup>d</sup>
2	7.7 ± 1.4 <sup>ab</sup>	15.0 ± 2.7 <sup>ab</sup>	25.6 ± 1.8 <sup>a</sup>	30.8 ± 3.0 <sup>c</sup>	79.1 ± 2.6 <sup>c</sup>
4	8.6 ± 1.4 <sup>a</sup>	14.7 ± 2.0 <sup>ab</sup>	26.6 ± 2.1 <sup>a</sup>	33.1 ± 3.0 <sup>bc</sup>	83.0 ± 5.1 <sup>bc</sup>
6	8.7 ± 1.2 <sup>a</sup>	16.5 ± 2.0 <sup>a</sup>	27.0 ± 1.5 <sup>a</sup>	36.9 ± 1.8 <sup>a</sup>	89.1 ± 4.3 <sup>a</sup>
8	9.0 ± 0.8 <sup>a</sup>	16.0 ± 2.0 <sup>a</sup>	26.7 ± 1.5 <sup>a</sup>	34.5 ± 2.5 <sup>ab</sup>	86.2 ± 4.3 <sup>ab</sup>

由表4可知,椰子油添加量对酸奶滋味的影响较小,但对色泽、风味、组织状态的影响显著。组织状态得分随着椰子油添加量的增加呈先增加后降低的趋势,说明添加椰子油能够改善酸奶的质地,使乳清不易析出,椰子油添加量为6%时酸奶组织状态得分最高,为36.9分,进一步增大椰子油添加量时,酸奶组织状态得分降低,可能是因为过量的椰子油会使酸奶硬度变大、黏度过高,从而影响酸奶的感官品质。色泽得分随着椰子油添加量的增大呈逐渐增加的趋势,说明添加椰子油能够提高酸奶的光泽度,改善酸奶的色泽。椰子油具有独特的清香气味,能够赋予酸奶独特的风味。随着椰子油添加量的增大,风味得分总体上也呈逐渐增加的趋势,在椰子油添加量为6%时风味得分最高,随着椰子油添加量的进一步增加,风味得分变化不明显。

综上所述,添加6%的椰子油,可有效提升酸奶的品质,此时酸奶感官评价得分最高,为89.1分。

### 2.2.3 质构特性的变化

椰子油添加量对酸奶质构特性的影响见表5。

表5 椰子油添加量对酸奶质构特性的影响

添加量/%	硬度/gf	黏性/(gf·s)	咀嚼性/gf	胶着性/gf
0	37.15 ± 0.79 <sup>e</sup>	7.64 ± 1.55 <sup>d</sup>	29.55 ± 0.34 <sup>d</sup>	33.56 ± 0.31 <sup>d</sup>
2	38.60 ± 0.23 <sup>d</sup>	13.04 ± 0.84 <sup>d</sup>	30.74 ± 0.22 <sup>d</sup>	34.61 ± 0.23 <sup>d</sup>
4	40.20 ± 0.32 <sup>c</sup>	19.87 ± 4.45 <sup>cd</sup>	32.33 ± 1.09 <sup>c</sup>	36.60 ± 0.17 <sup>c</sup>
6	45.71 ± 0.60 <sup>b</sup>	38.72 ± 4.82 <sup>b</sup>	35.63 ± 0.06 <sup>b</sup>	40.14 ± 0.23 <sup>b</sup>
8	56.33 ± 0.13 <sup>a</sup>	94.31 ± 6.15 <sup>a</sup>	43.05 ± 1.10 <sup>a</sup>	48.05 ± 1.20 <sup>a</sup>

由表5可知,随着椰子油添加量的增加,酸奶的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性均呈增加的趋势。与未添加椰子油相比,当椰子油添加量为2%时,酸奶的硬度显著增大,而黏性、咀嚼性、胶着性无显著变化,进一步增加椰子油的添加量,酸奶的硬度、黏性、咀嚼性、胶着性均显著增大。王建辉等<sup>[10]</sup>研究发现,脂肪作为填充剂会影响大豆分离蛋白凝胶的硬度和凝胶特性。程欣玥等<sup>[11]</sup>报道,在酸奶特有的凝胶结构中,变性酪蛋白颗粒非常规则地排成链状,

堆积构成凝胶体网状立体结构,网状结构中间形成无数规则的空隙。因此,增强蛋白簇之间的连接,以及缩小网络结构的空隙,均可以增加酸奶的凝胶强度。椰子油酸奶质构特性的改变,可能是由于椰子油的添加,填补了酸奶凝胶中的空隙,使酸奶的凝胶网络更加致密,从而使硬度、黏度等均得到提升。当椰子油添加量为8%时,与添加量为6%时相比,酸奶的硬度、黏性、咀嚼性、胶着性分别增加了23.23%、143.57%、20.83%和19.71%,其中黏性的增加幅度极显著,过高的黏性导致感官上组织状态评分的降低,与感官评价的结果相符合。

#### 2.2.4 持水力的变化

椰子油添加量对酸奶持水力的影响如图2所示。

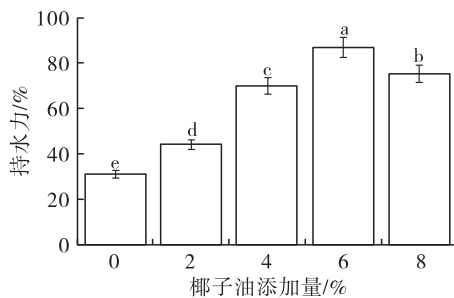


图2 椰子油添加量对酸奶持水力的影响

由图2可知,酸奶的持水力随着椰子油添加量的增加呈先升高后降低的趋势。与未加椰子油相比,椰子油的添加能显著提高酸奶的持水力,这可能是由酸奶复杂的网络结构导致的,添加椰子油填充了酸奶的网络空隙,增加了酸奶体系的硬度与黏度,从而显著提升了酸奶的持水力<sup>[12-14]</sup>。当椰子油添加量为6%时,酸奶的持水力最高,为87.1%,主要是因为随着椰子油添加量的增加,凝胶网络空隙得到进一步的填充,更有利于包裹自由水;进一步增加椰子油添加量,酸奶持水力开始下降,主要是因为过量的油无法进一步填充蛋白网络空隙,并且形成疏水的区域,无法更好地锁住自由水。

#### 2.2.5 色度的变化

乳液的亮度通常由散射效应决定,颜色则取决于乳液对不同波长及频率光的吸收<sup>[15]</sup>。椰子油添加量对酸奶色度的影响见表6。

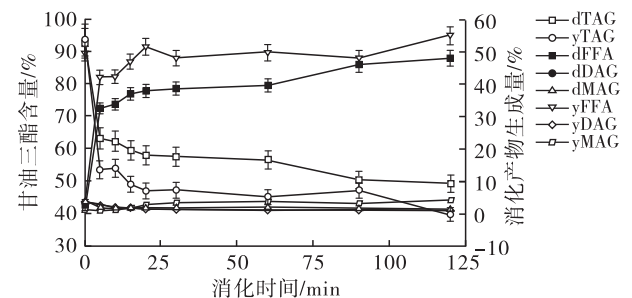
表6 椰子油添加量对酸奶色度的影响

添加量/%	$L^*$	$a^*$	$b^*$
0	83.54 ± 0.10 <sup>c</sup>	-3.34 ± 0.10 <sup>a</sup>	4.47 ± 0.06 <sup>d</sup>
2	88.55 ± 0.18 <sup>b</sup>	-2.19 ± 0.06 <sup>d</sup>	5.49 ± 0.04 <sup>b</sup>
4	88.94 ± 0.06 <sup>b</sup>	-2.88 ± 0.08 <sup>b</sup>	5.89 ± 0.05 <sup>a</sup>
6	89.42 ± 0.30 <sup>b</sup>	-2.47 ± 0.04 <sup>c</sup>	4.21 ± 0.07 <sup>e</sup>
8	91.24 ± 1.07 <sup>a</sup>	-2.38 ± 0.05 <sup>c</sup>	5.03 ± 0.07 <sup>c</sup>

由表6可知,与未添加椰子油相比,随着椰子油的加入,酸奶的亮度显著增大,在椰子油添加量为8%时,酸奶的亮度最高,这与感官评价中随着椰子油添加量增加色泽评分增大的趋势一致,主要原因是椰子油的加入提高了酸奶散射的强度,随着椰子油添加量的增加,散射强度也有所提高。与未添加椰子油相比,随着椰子油的加入,酸奶的绿度显著减小,黄度普遍增大(除6%添加量组),可能是因为椰子油的加入影响了酸奶对不同波长光的吸收,导致绿度及黄度产生显著差异。

#### 2.3 椰子油添加量对酸奶体外消化规律的影响

椰子油基酸奶在静态体外肠消化模型中的体外消化产物释放规律如图3所示。其中对照组为使用全脂牛奶调配而成的调制乳(该调制乳含油量为6%,且与椰子油添加量为6%的复原乳的平均粒径处于同一水平)经相同发酵工艺制作而成。



注:dTAG、dFFA、dDAG、dMAG 分别代表对照组酸奶中的甘油三酯、脂肪酸、甘油二酯和甘油单酯;yTAG、yFFA、yDAG、yMAG 分别代表椰子油基酸奶中的甘油三酯、脂肪酸、甘油二酯和甘油单酯;消化产物包括脂肪酸、甘油二酯和甘油单酯

图3 不同酸奶在静态体外肠消化模型中的消化产物释放率

由图3可知,同一消化时间下,椰子油基酸奶的脂肪酸释放程度及甘油三酯水解程度显著高于对照组。椰子油基酸奶和对照组酸奶的起始甘油三酯及脂肪酸含量分别为93.77%、2.98%和91.93%、2.00%。椰子油基酸奶与对照组酸奶在模拟体外肠消化120 min后,体系中的甘油三酯及脂肪酸含量分别为39.72%、55.09%与49.03%、47.77%。椰子油基酸奶的甘油三酯水解率及脂肪酸释放率分别比对照组酸奶高了25.99%及13.85%,说明椰子油基酸奶中的甘油三酯水解程度更高,脂肪酸释放速率更快。一方面的原因可能是MCFA相比于LCFA更利于水解,另一方面可能是椰子油基酸奶的凝胶特性更有利于酸奶中椰子油的消化。消化是吸收的前提,油脂以脂肪酸或甘油单酯的形式才能被吸收利用,椰子油基酸奶具有更高的消化水平,更有利于酸奶的消化与吸收。

### 3 结论

本研究通过将椰子油添加到脱脂奶粉中制成复原乳,进而发酵制成酸奶。探究了椰子油添加量与复原乳平均粒径及粒径分布之间的关系,然后探究了椰子油添加量对酸奶品质及消化特性的影响。结果表明,椰子油添加量在2%~8%时,复原乳粒径分布无显著差异,当椰子油添加量为6%时,酸奶的整体品质最好。体外消化模拟实验表明,椰子油基酸奶脂质水解程度更高,脂肪酸释放速率更快,说明椰子油基酸奶对于人体消化吸收脂肪具有积极的影响。

#### 参考文献:

- [1] 白海娜. 凝固型酸奶的营养成分及研究进展[J]. 现代食品, 2019, 8(16):108-110.
- [2] 解冰心, 唐善虎, 李思宁, 等. 添加不同植物油对益生菌酸奶品质、风味及发酵特性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10):151-157.
- [3] 沈壮. 低脂大豆酸奶品质分析及体外消化特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [4] 柴溢, 张毅, 姜铁民, 等. UPLC法测定牛乳脂肪中脂肪酸的构成[J]. 食品科技, 2014, 39(6):272-275.
- [5] 崔志娟, 齐鸣, 谭碧娥. 中链脂肪酸甘油三酯在仔猪中的消化吸收及生理功能[J]. 动物营养学报, 2021, 33(10):5441-5448.
- [6] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGERI M, et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nat Protoc, 2019, 14(4):991-1014.
- [7] 彭松林, 张伊依, 赵紫悦, 等. 酪蛋白酸钠-大豆油乳化体系的影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1):107-115, 124.
- [8] 郝慧敏, 靳学远, 刘艳芳. 超高压均质制备牡丹籽油纳米乳液及稳定性研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(9):78-81.
- [9] 倪玲英, 何利民. 波纹板间油滴的 Stokes 浮升模拟分析[J]. 过滤与分离, 2007, 17(2):18-20.
- [10] 王建辉, 靳娜, 成媛媛, 等. 基于大豆分离蛋白的脂肪模拟工艺条件优化[J]. 食品科学, 2014, 35(16):6-10.
- [11] 程欣玥, 孙小茜, 石静静, 等. 增稠剂促进酸奶凝胶的机理及应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21):325-332.
- [12] 李红娟, 刘婷婷, 邹璇, 等. 乳清蛋白-黄油乳液凝胶对低脂酸奶理化特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7):71-77.
- [13] 郑健, 房天琪, 沈雪, 等. 乳清分离蛋白与燕麦 $\beta$ -葡聚糖作为增稠剂在酸奶中的应用[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(7):21-25.
- [14] 张福荣, 曾雪峰, 陆丹丹. 鲟鱼鱼糜对酸奶质构特性与品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(1):89-96.
- [15] NG S, KHOR Y, LIM H, et al. Fabrication of concentrated palm olein-based diacylglycerol oil-soybean oil blend oil-in-water emulsion: in-depth study of the rheological properties and storage stability[J/OL]. Foods, 2020, 9:877 [2022-07-07]. <https://doi.org/10.3390/foods9070877>.
- 
- (上接第124页)
- [37] 徐明辉, 张骊, 陈东升, 等. 元宝枫籽油及神经酸制取工艺[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(1):41-43.
- [38] 李俊雯, 朱明明, 吴梦琪, 等. 分子蒸馏结合尿素包合法富集罗汉菜籽油中神经酸[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2):82-87.
- [39] YI F, SUN J, BAO X, et al. Influence of molecular distillation on antioxidant and antimicrobial activities of rose essential oils[J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 102:310-316.
- [40] YAN R, SHEN J, LIU X, et al. Preparative isolation and purification of hainanmurpanin, meranzin, and phebalosin from leaves of *Murraya exotica* L. using supercritical fluid extraction combined with consecutive high-speed countercurrent chromatography[J]. J Sep Sci, 2018, 41(9):2092-2101.
- [41] LIANG Z, XIE Z, LAM S, et al. Optimization of the fractional precipitation of paclitaxel from a *Taxus chinensis* cell culture using response surface methodology and its isolation by consecutive high-speed countercurrent chromatography[J]. J Sep Sci, 2014, 37(17):2322-2330.
- [42] 赵艳, 朱晶, 王向东. 高速逆流色谱纯化元宝枫神经酸的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(6):251-254.
- [43] HEWAVITHARANA G G, PERERA D N, NAVARATNE S B, et al. Extraction methods of fat from food samples and preparation of fatty acid methyl esters for gas chromatography: a review[J]. Arab J Chem, 2020, 13(8):6865-6875.
- [44] 寇秀颖, 于国萍. 脂肪和脂肪酸甲酯化方法的研究[J]. 食品研究与开发, 2005(2):46-47.
- [45] 张英明. 气相色谱法的原理及其在食品农药残留检测中的应用[J]. 食品安全导刊, 2021(35):187-189.
- [46] LIANG Q, FANG H, LIU J, et al. Analysis of the nutritional components in the kernels of yellowhorn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) accessions[J/OL]. J Food Compos Anal, 2021, 100:103925 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103925>.
- [47] PIOVESANA S, AITA S E, CANNAZZA G, et al. In-depth cannabis fatty acid profiling by ultra-high performance liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry[J/OL]. Talanta, 2021, 228:122249 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122249>.
- [48] 孟超. 质谱联用技术在药品分析中的应用[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(5):190-192.