

王宪青, 白吉敏, 陈文璐, 等. 姜黄牛初乳发酵乳的制备及其抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 163-170. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070190

WANG Xianqing, BAI Jimin, CHEN Wenlu, et al. Preparation and Antioxidant Activity of Turmeric Colostrum Fermented Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 163-170. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070190

· 工艺技术 ·

# 姜黄牛初乳发酵乳的制备及其 抗氧化活性研究

王宪青<sup>1</sup>, 白吉敏<sup>1</sup>, 陈文璐<sup>2</sup>, 刘妍妍<sup>1</sup>, 栾跃婷<sup>1</sup>, 罗云<sup>1</sup>, 朱建宇<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2. 山东得益乳业股份有限公司技术中心, 山东淄博 265200)

**摘要:** 为开发一种具有较高抗氧化能力的姜黄牛初乳发酵乳, 以感官评价为响应值, 在单因素的基础上, 通过响应面分析法对姜黄牛初乳发酵乳配方进行优化, 并对产品的理化指标和抗氧化活性进行分析。结果表明, 姜黄牛初乳发酵乳的最佳工艺为: 姜黄素微胶囊添加量 0.5%、接种量 2%、牛初乳添加量 30%、蔗糖添加量 6%, 此时发酵乳感官评分达到 91.24; 姜黄牛初乳发酵乳的硬度为 0.97 N, 弹性 3.96 mm, 胶粘性 0.83 N, 内聚性 0.83, 黏度 0.62 mJ, 酸度为 88.63 °T, 蛋白质含量 3.98 g/100 g, 脂肪含量 0.46 g/100 g, 乳酸菌数  $6.59 \times 10^8$  CFU/mL, 未检出致病菌; 在酸奶浓度为 25% 时, 姜黄牛初乳发酵乳对 DPPH·、ABTS<sup>+</sup> 和羟自由基的清除率分别为 89.59%、95.39%、63.26%, 抗氧化能力明显优于普通发酵乳。

**关键词:** 姜黄素微胶囊, 牛初乳, 发酵乳, 品质分析, 抗氧化活性

中图分类号: TS252.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)14-0163-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070190



本文网刊:

## Preparation and Antioxidant Activity of Turmeric Colostrum Fermented Milk

WANG Xianqing<sup>1</sup>, BAI Jimin<sup>1</sup>, CHEN Wenlu<sup>2</sup>, LIU Yanyan<sup>1</sup>, LUAN Yueting<sup>1</sup>, LUO Yun<sup>1</sup>, ZHU Jianyu<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. Technology Center, Shandong Deyi Dairy Products Co., Ltd., Zibo 265200, China)

**Abstract:** In order to develop a kind of turmeric bovine colostrum fermented milk with high antioxidant capacity, the formula of turmeric bovine colostrum fermented milk was optimized by response surface analysis on the basis of single factors, with sensory evaluation as the response value, and the physicochemical indexes and antioxidant activity of the product were analyzed. The results showed that the optimal fermentation process of turmeric bovine colostrum was as follows: Curcumin microcapsule dosage of 0.5%, inoculum dosage of 2%, colostrum dosage of 30%, sucrose dosage of 6%, and the sensory score of fermented milk reached 91.24. The hardness of turmeric colostrum fermented milk was 0.97 N, elasticity was 3.96 mm, viscosity was 0.83 N, cohesion was 0.83, viscosity was 0.62 mJ, acidity was 88.63 °T, protein content was 3.98 g/100 g, fat content was 0.46 g/100 g, lactic acid bacteria count was  $6.59 \times 10^8$  CFU/mL, no pathogenic bacteria were detected. When the concentration of yogurt was 25%, the scavenging rates of DPPH·, ABTS<sup>+</sup> and hydroxyl free radical of turmeric bovine colostrum fermented milk were 89.59%, 95.39% and 63.26%, respectively. The antioxidant capacity of turmeric bovine colostrum fermented milk was significantly better than that of ordinary fermented milk.

**Key words:** curcumin microcapsule; bovine colostrum; acidified milk; quality analysis; antioxidant activity

发酵乳是一种含有活性益生菌的发酵乳制品, 以生牛乳为原料, 通过杀菌过程后加入发酵剂进行发

收稿日期: 2022-07-19

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大项目: 功能性液态奶的研制及产业化 (2019ZX07B02)。

作者简介: 王宪青 (1977-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xqwang1977@126.com。

酵<sup>[1]</sup>, 其具有营养丰富、易消化吸收、改善免疫力等作用<sup>[2-6]</sup>。发酵乳是世界上最受欢迎的乳制品之一, 味道酸甜, 是提供有益功能性成分的有效介质。随着消费者越来越熟知酸奶的功能, 具有保健功效的酸奶已成为一个热门的研究课题。如添加菊花、枸杞提取液等辅助降血糖功能性酸奶, 添加魔芋甘露寡糖、燕麦等提高免疫力的功能性酸奶<sup>[7-9]</sup>。

姜黄是一种重要的药用草药, 在中国、印度和其他国家广泛使用, 可作调味品、天然色素和染料<sup>[10]</sup>。姜黄的主要成分为挥发油和姜黄素, 具有较好的抗炎、抗氧化、预防阿尔兹海默症、抗肿瘤等生物活性<sup>[11-12]</sup>。然而, 其强烈的疏水性和稳定的晶体结构, 导致其在水溶液中溶解度非常低, 这严重限制了其在水基营养制剂中的使用<sup>[13]</sup>。现有研究表明, 利用微胶囊技术封装功能性活性物质, 不仅可以解决溶解度等问题, 还可以增加营养物质的含量和吸收<sup>[14-16]</sup>。

牛初乳是健康母牛分娩 3 d 内从乳腺分泌的淡黄色乳汁, 含有许多功能性成分, 如免疫球蛋白、乳铁蛋白、生物活性肽等<sup>[17-18]</sup>, 具有增强免疫力、促进组织生长、调节肠道菌群、修复受损组织等功效<sup>[19-22]</sup>。随着对牛初乳功能性成分的不断深入研究, 牛初乳受到越来越多的重视, 目前除了牛初乳粉、奶片产品外, 其他形式的加工产品极少<sup>[23-25]</sup>。基于此, 本研究将牛初乳、鲜牛乳与姜黄微胶囊为原料, 通过与复合菌混合发酵, 以感官评价为主要考察指标, 响应面优化姜黄牛初乳发酵乳的发酵工艺及抗氧化活性, 为进一步研究其他风味发酵乳制品产品的功能提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

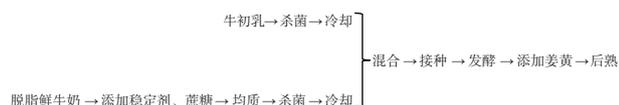
脱脂鲜牛奶、白砂糖、果胶、CMC、单甘酯等食品级, 市售; 牛初乳 黑龙江省完达山乳业有限公司; 姜黄素微胶囊、普通发酵乳 实验室自制; 保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、鼠李糖乳杆菌 北京川秀科技有限公司; MRS 培养基、MC 培养基 青岛海博生物技术有限公司; DPPH、ABTS 美国 Sigma 公司; 无水乙醇、硫酸亚铁、过氧化氢、维生素 C、水杨酸、氢氧化钠 分析纯, 辽宁泉瑞试剂有限公司。

AUY220 电子天平 上海盛科仪器设备有限公司; DRP-9032 恒温培养箱 上海森信实验仪器有限公司; APV2000 均质机 上海史恒仪器有限公司; 722 可见分光光度计 上海仪田精密仪器有限公司; TA.XT.Plus 质构仪 英国 Sable Micro System 公司; SW-CJ-2F 超净工作台 上海力辰科技仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 工艺流程

##### 1.2.1.1 姜黄牛初乳发酵乳的制备



1.2.1.2 普通发酵乳的制备 脱脂鲜牛奶→添加稳定剂、蔗糖→均质→杀菌→冷却→接种→发酵→后熟

1.2.2 操作要点 牛初乳在 63 °C 杀菌 30 min, 后迅速冷却至 35 °C 左右<sup>[26]</sup>。将鲜牛奶与蔗糖混合预热至 60 °C, 15 MPa 均质 10 min<sup>[27]</sup>。将均质后的混合乳在 90 °C 杀菌 15 min<sup>[28]</sup>, 杀菌后迅速冷却至 35 °C 左右<sup>[26]</sup>, 并与杀菌后牛初乳充分搅拌, 使其混匀, 按保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、鼠李糖乳杆菌 1: 1: 2 比例接种<sup>[29]</sup>, 混匀后 42 °C 发酵, 发酵结束后加入姜黄素微胶囊混合均匀, 放入 4 °C 冰箱后熟 14 h, 即得姜黄牛初乳酸奶。

#### 1.2.3 单因素实验

1.2.3.1 姜黄素微胶囊添加量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响 设定发酵时间 8 h, 发酵温度 42 °C, 接种量 3%, 牛初乳添加量 30%, 蔗糖添加量 4%, 考察不同姜黄素微胶囊添加量(0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9%)对姜黄牛初乳酸奶感官评价和酸度的影响。

1.2.3.2 接种量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响 设定发酵时间 8 h, 发酵温度 42 °C, 姜黄素微胶囊添加量 0.5%, 牛初乳添加量 30%, 蔗糖添加量 4%, 考察不同接种量(1%、2%、3%、4%、5%)对姜黄牛初乳酸奶感官评价和酸度的影响。

1.2.3.3 牛初乳添加量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响 设定发酵时间 8 h, 发酵温度 42 °C, 姜黄素微胶囊添加量 0.5%, 接种量 3%, 蔗糖添加量 4%, 考察不同牛初乳添加量(20%、30%、40%、50%、60%)对姜黄牛初乳酸奶感官评价和酸度的影响。

1.2.3.4 蔗糖添加量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响 设定发酵时间 8 h, 发酵温度 42 °C, 姜黄素微胶囊添加量 0.5%, 牛初乳添加量 30%, 接种量 3%, 考察不同蔗糖添加量(2%、4%、6%、8%、10%)对姜黄牛初乳酸奶感官评价和酸度的影响。

1.2.4 响应面优化试验设计 在单因素实验的基础上, 根据 Box-Behnken 组合试验设计原理, 以感官评价(Y)为响应值, 利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据处理, 对发酵工艺参数进行优化, 响应面优化试验设计与水平见表 1。

表 1 响应面优化试验因素水平表  
Table 1 Factors and levels table of response surface experiment

水平	因素			
	A姜黄素微胶囊添加量(%)	B接种量(%)	C牛初乳添加量(%)	D蔗糖添加量(%)
-1	0.3	1	20	4
0	0.5	2	30	6
1	0.7	3	40	8

1.2.5 理化指标的测定 蛋白质含量的测定: 按照国标 GB 5009.5-2016 中的凯式定氮法执行<sup>[30]</sup>; 脂肪含

量的测定:按照国标 GB 5009.6-2016 中的碱水解法执行<sup>[31]</sup>;酸度的测定:按照国标 GB 5009.239-2016 中的酚酞指示剂法执行<sup>[32]</sup>。

1.2.6 微生物指标的测定 按照 GB 4789-2016《食品微生物学检验》测定发酵乳中乳酸菌数和致病菌数<sup>[33]</sup>。

1.2.7 感官评价标准 感官评价标准依据 GB 19302-2010《食品安全国家标准 发酵乳》进行设定<sup>[34]</sup>,见表 2,参评人数 10 人,男女比例各占一半,要求对姜黄牛初乳酸奶的气味、色泽、滋味、组织状态进行评分,取平均分作为感官评分。

表 2 感官评价标准  
Table 2 Sensory evaluation standard

评分项目(分)	评分标准	评分(分)
色泽(20)	色泽均匀一致,呈淡黄色	16~20
	色泽较均匀,颜色过淡或过浓	11~15
	色泽不均匀,颜色异常	1~10
气味(20)	有姜黄及乳香味,且气味协调	16~20
	姜黄及乳香味较淡,气味较协调	11~15
	气味不协调,无香味	1~10
滋味(30)	口感细腻柔和,酸甜可口,无奶腥味	21~30
	口感略粗糙,酸甜适宜,微带腥味	11~20
	口感粗糙,酸甜不适宜,腥味重,不可接受	1~10
组织状态(30)	组织细腻均匀,无乳清析出,无气泡	21~30
	组织较细腻均匀,少量乳清析出,少量气泡	11~20
	组织不均匀,有大量气泡和乳清析出	1~10

1.2.8 质构测定 使用 TA.XT.Plus 质构仪,选用 TA/BE 反挤压检测探头,测前速度为 1 mm/s,测后速度 10 mm/s,测试深度 30 mm,触发力为 Auto-5.0 g,测试速度为 60 mm/s。样品为 4 °C 储存 12 h 的发酵乳,每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。

1.2.9 DPPH 自由基清除能力的测定 取 1 mL 发酵乳稀释成不同倍数,取 2.0 mL 稀释溶液与 2.0 mL 95% 乙醇混匀后,加入 2.0 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液,摇匀后避光反应 30 min,4000 r/min 离心 10 min,于波长 517 nm 下测定吸光度<sup>[35-36]</sup>。

$$\text{清除率}(\%) = \left[ 1 - \frac{(A_1 - A_2)}{A_0} \right] \times 100$$

式中:  $A_0$ : DPPH 溶液的吸光度;  $A_1$ : 样液和 DPPH 溶液混合液的吸光度;  $A_2$ : 样液和 95% 乙醇混合液的吸光度。

1.2.10 羟自由基清除能力的测定 取 1 mL 发酵乳稀释成不同倍数,取 2.0 mL 6 mmol/L  $\text{FeSO}_4$  溶液与 2 mL 6 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液混匀,加入稀释后的发酵乳,再加入 2 mL 20 mol/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液混匀,于 37 °C 下恒温水浴 60 min,4000 r/min 离心 10 min,冷却后在波长 510 nm 处测定吸光度<sup>[37]</sup>。

$$\text{清除率}(\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_0 - A_1} \times 100$$

式中:  $A_0$ : 不含样液样品与  $\text{H}_2\text{O}_2$  的吸光度;  $A_1$ : 不含样液,含  $\text{H}_2\text{O}_2$  的吸光度;  $A_2$ : 含样液与  $\text{H}_2\text{O}_2$  的吸光度。

1.2.11 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的测定 取 1 mL 发酵乳稀释成不同倍数,取 0.5 mL 稀释溶液于 4.5 mL 已稀释完成的 ABTS<sup>+</sup>溶液混匀,避光条件下反应 6 min,于 734 nm 处测定吸光度<sup>[38]</sup>。

$$\text{清除率}(\%) = \left[ 1 - \frac{(A_1 - A_2)}{A_0} \right] \times 100$$

式中:  $A_0$ : 0.5 mL 蒸馏水与 4.5 mL ABTS<sup>+</sup>混合液的吸光度;  $A_1$ : 0.5 mL 样液与 4.5 mL ABTS<sup>+</sup>混合液的吸光度;  $A_2$ : 0.5 mL 样液与 4.5 mL 无水乙醇混合液的吸光度。

### 1.3 数据处理

采用 Origin 软件进行数据的录入与处理, Design Expert 8.06 软件用于响应面的数据及方差分析, SPSS 用于方差分析,差异显著性判断标准为  $P < 0.05$ 。实验数据均为 3 次平行试验的均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验

2.1.1 姜黄素微胶囊添加量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响 由图 1 可以看出,酸度和感官评分随姜黄素微胶囊添加量的增加,呈先升高后降低的趋势,姜黄素微胶囊添加量 0.5% 时发酵乳的色泽、气味、滋味、组织状态最佳,感官评分最高为 90.33,酸度为 89.71 °T。因为姜黄素被  $\beta$ -环糊精包埋,掩盖了其中草药味,发酵乳的颜色类似于芒果或香蕉的黄色;添加量大于 0.5% 时,姜黄气味过重,颜色较深,导致感官评分降低。因此选择姜黄素微胶囊添加量 0.3%、0.5%、0.7% 进行响应面试验。

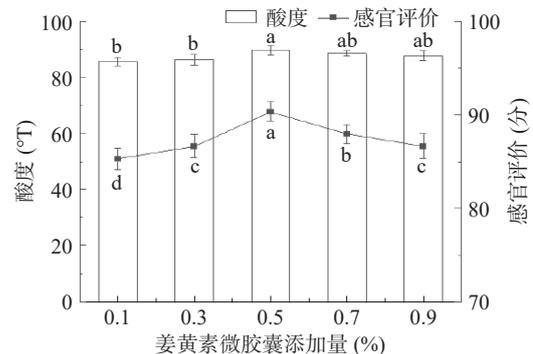


图 1 姜黄素微胶囊添加量对发酵乳酸度及感官评价的影响  
Fig.1 Effects of curcumin microcapsule addition amount on acidity and sensory evaluation of fermented milk

2.1.2 接种量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响 由图 2 可知,酸度随着接种量的增加逐渐增大,感官评分则先升高后降低。接种量 2% 时发酵乳的色泽、气味、滋味、组织状态最佳,感官评分最高为 90.33,酸度为 85.91 °T。这可能是由于乳糖在发酵过程中被菌种分解产生乳酸等有机酸,导致酸度增大。当接种量

过小于 2% 时, 乳酸菌产酸能力弱, 发酵乳发酵时间较长且组织不均匀, 酸味不够; 接种量大于 2% 时, 糖类转化为乳酸量逐渐增多, 酸味突出, 凝乳速度过快, 乳清析出明显, 酸奶品质不佳。因此选择接种量 1%、2%、3% 进行响应面试验。

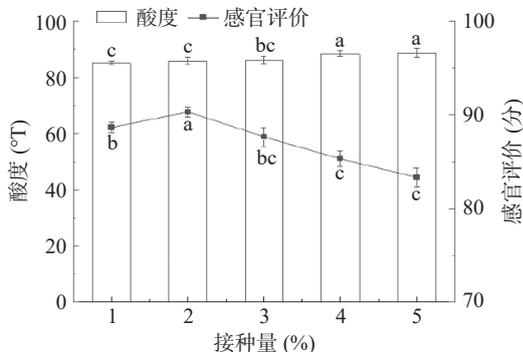


图2 接种量对发酵乳酸度及感官评价的影响

Fig.2 Effects of inoculation amount on acidity and sensory evaluation of fermented milk

### 2.1.3 牛初乳添加量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响

由图 3 可知, 随酸度着牛初乳添加量的增加逐渐下降, 感官评分则先升高后降低。牛初乳与鲜牛乳配比 3:7(牛初乳添加量 30%)时发酵乳的色泽、气味、滋味、组织状态最佳, 感官评分最高为 92.67, 酸度为 87.37 °T。这可能是由于牛初乳中有一种天然的乳过氧化酶抑菌体系, 对于乳酸菌的生长有抑制作用, 所以牛初乳在发酵过程中比在普通牛奶产酸更慢, 导致酸度降低; 牛初乳添加量过少, 乳香味淡, 添加量过多, 乳腥味过重, 组织状态不稳定, 气味不协调, 造成感官评分降低。因此选择牛初乳添加量 20%、30%、40% 进行响应面试验。

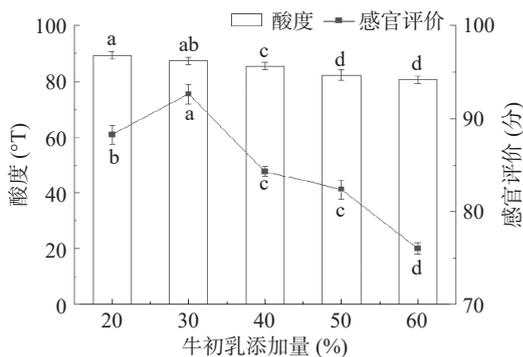


图3 牛初乳添加量对发酵乳酸度及感官评价的影响

Fig.3 Effects of colostrum supplementation on acidity and sensory evaluation of fermented milk

### 2.1.4 蔗糖添加量对姜黄牛初乳酸奶品质的影响

由图 4 可知, 酸度随着白砂糖的添加而上升, 感官评分则先升高后降低。蔗糖添加量 6% 时发酵乳的色泽、气味、滋味、组织状态最佳, 感官评分最高为 93.67, 酸度为 87.63 °T。可能是糖分的不断加入为乳酸菌的生长提供了足够的碳源, 促使乳酸菌产酸, 导致酸度升高。当添加量低于 6% 时, 则发酵不彻

底, 甜味不够, 酸奶整体口感不协调; 添加量高于 6%, 糖类转化为乳酸量逐渐增加, 抑制了发酵过程, 导致甜味突出, 口感差。因此选择蔗糖添加量 4%、6%、8% 进行响应面试验。

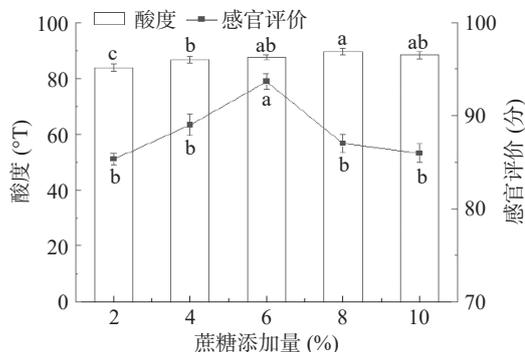


图4 蔗糖添加量对发酵乳酸度及感官评价的影响

Fig.4 Effects of sucrose supplemental level on acidity and sensory evaluation of fermented milk

## 2.2 响应面试验

2.2.1 响应面试验设计及结果 选取四个因素作为考察因子, 即姜黄素微胶囊添加量(A)、接种量(B)、牛初乳添加量(C)和蔗糖添加量(D), 以感官评分为响应值(Y), 采用 Box-Behnken 设计原理, 优化发酵乳的发酵工艺, 如表 3 所示。

表3 响应面试验设计及结果

Table 3 Experimental design and results for respond surface analysis

实验号	A	B	C	D	感官评分(分)
1	1	0	-1	0	82.77
2	0	1	-1	0	73.08
3	0	0	-1	-1	65.38
4	1	-1	0	0	79.81
5	1	0	1	0	81.73
6	0	0	0	0	89.42
7	-1	1	0	0	68.27
8	-1	-1	0	0	70.15
9	0	1	1	0	79.81
10	1	0	0	-1	74.04
11	0	0	1	-1	80.77
12	-1	0	0	-1	61.54
13	0	1	0	1	78.85
14	0	-1	0	-1	69.23
15	0	1	0	-1	69.22
16	-1	0	0	1	72.12
17	0	0	-1	1	76.92
18	0	-1	0	1	75.00
19	1	1	0	0	76.90
20	1	0	0	1	77.87
21	0	-1	1	0	80.76
22	0	0	1	1	79.81
23	-1	0	-1	0	64.32
24	0	0	0	0	92.31
25	0	-1	-1	0	74.08
26	0	0	0	0	93.27
27	0	0	0	0	90.38
28	0	0	0	0	93.67
29	-1	0	1	0	80.75

利用 Design-Expert 软件, 采用 Box-Behnken 设计原理, 优化姜黄牛初乳发酵乳的工艺, 如表 3 所示。对表 3 中试验数据进行分析, 得到响应面回归模拟方程:  $Y=91.81+4.66A-0.2417B+3.92C+3.37D-0.2575AB-4.37AC-1.69AD+0.0125BC+0.965BD-3.13CD-9.34A^2-8.73B^2-5.60C^2-10.53D^2$ 。

如表 4 所示, 对二次多项回归方程进行显著性分析。模型  $P<0.0001$ , 说明该模型极显著, 失拟项 ( $P=0.7604>0.05$ ), 不显著, 表明该模型具有可行性。模型回归系数  $R^2=0.9834$ , 校正决定系数  $R^2_{Adj}=0.9667$ , 说明实验误差小, 可用于优化姜黄牛初乳酸奶的工艺。

表 4 回归方程方差分析  
Table 4 Analysis of variance for regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P
模型	2028.47	14	144.89	59.07	<0.0001**
A	261.05	1	261.05	106.43	<0.0001**
B	0.7008	1	0.7008	0.2857	0.6014
C	184.71	1	184.71	75.31	<0.0001**
D	135.95	1	135.95	55.42	<0.0001**
AB	0.2652	1	0.2652	0.1081	0.7471
AC	76.30	1	76.30	31.11	<0.0001**
AD	11.39	1	11.39	4.64	0.0491*
BC	0.0006	1	0.0006	0.0003	0.9875
BD	3.72	1	3.72	1.52	0.2381
CD	39.06	1	39.06	15.93	0.0013**
A <sup>2</sup>	565.50	1	565.50	230.55	<0.0001**
B <sup>2</sup>	493.88	1	493.88	201.35	<0.0001**
C <sup>2</sup>	203.30	1	203.30	82.88	<0.0001**
D <sup>2</sup>	718.83	1	718.83	293.06	<0.0001**
残差	34.34	14	2.45		
失拟项	20.74	10	2.07	0.6101	0.7604
纯误差	13.60	4	3.40		
总和	2062.81	28			

由分析结果可知, 因素一次项中 A、C、D 对发酵乳感官评分的影响极显著 ( $P<0.01$ ), B 对感官评分影响不显著 ( $P>0.05$ ), 根据因素的 F 值, 确定各因素对发酵乳品质影响顺序为: 姜黄素微胶囊添加量>牛初乳添加量>蔗糖添加量>接种量。

2.2.2 响应面分析 根据 Design-Expert 对回归方程分析, 各因素对发酵乳感官评分的交互作用的响应面三维图, 如图 5 所示, 曲面图陡峭程度越大, 交互作用越强, 曲面图陡峭程度越小, 交互作用越弱, 因此各交互作用对发酵乳感官评分的影响从大到小以此为  $AC>CD>AD>BD>AB>BC$ , 其中 AC、CD 对感官评分影响极显著 ( $P<0.01$ ), AD 对感官评分影响显著 ( $P<0.05$ ), 与表 4 结果一致。利用 Design-Expert 分析得到最佳姜黄素微胶囊添加量 0.536%、接种量 1.99%、牛初乳添加量 32.497%、蔗糖添加量 6.216%, 此条件下姜黄牛初乳发酵乳的感官评分达到 92.906。考虑实际操作情况, 将最佳工艺参数调整为: 姜黄素微胶囊添加量 0.5%, 接种量 2%, 牛初乳添加量 30%, 蔗糖添加量 6%。在此条件下进行 3 次重复试验, 得到姜黄牛初乳发酵乳的感官评分为  $91.24\pm 1.33$ ,

与预测值的相对偏差较小, 说明利用响应面优化的姜黄牛初乳发酵乳的工艺参数是可行的。

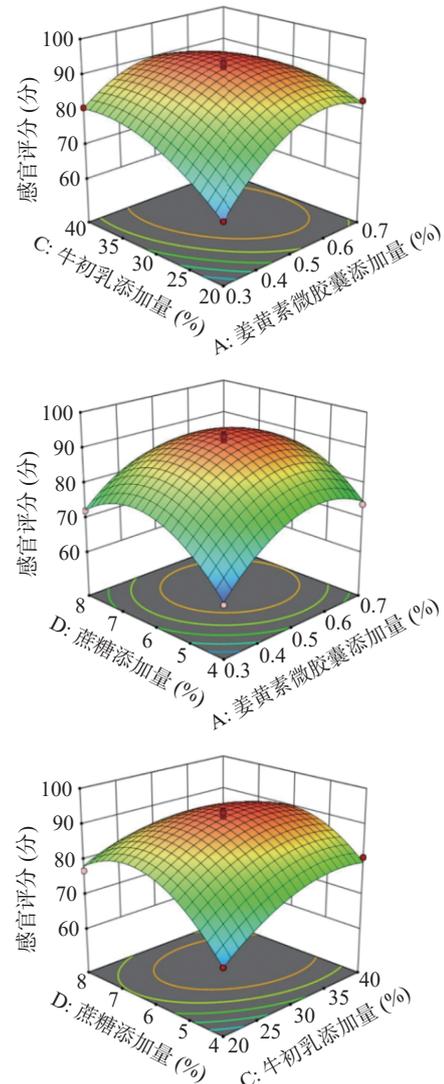


图 5 两因素交互作用对姜黄牛初乳发酵乳感官评分的响应面图

Fig.5 Response surface diagram of the interaction of two factors on sensory score of curcuma colostrum fermented milk

### 2.3 理化指标测定结果

由表 5 可知, 经检测, 响应面优化得出的最优发酵工艺下制备的姜黄牛初乳发酵乳和普通发酵乳的蛋白质、脂肪、酸度均符合国家标准。

表 5 理化指标测定结果  
Table 5 Determination results of physical and chemical indexes

指标	《食品安全国家标准 发酵乳》	普通发酵乳	姜黄牛初乳发酵乳
蛋白质(g/100 g)	$\geq 2.3$	$3.87\pm 0.03$	$3.98\pm 0.04$
脂肪(g/100 g)	脱脂产品 $\leq 0.5$	$0.34\pm 0.02$	$0.46\pm 0.01$
酸度( $^{\circ}T$ )	70.0	$87.24\pm 0.86$	$88.63\pm 1.13$

### 2.4 微生物指标的测定

姜黄牛初乳发酵乳乳酸菌总数为  $6.59\times 10^8$  CFU/mL, 普通发酵乳乳酸菌总数为  $2.6\times 10^7$  CFU/mL, 符合

GB 19302-2010《食品安全国家标准 发酵乳》的要求。

### 2.5 质构特性分析

姜黄牛初乳发酵乳和普通发酵乳的质构性质参数见表6。姜黄牛初乳发酵乳的硬度、胶黏性和黏度都高于普通发酵乳,内聚性与普通发酵乳接近,但弹性却低于普通发酵乳,这可能是由于添加的姜黄素微胶囊与酪蛋白和乳清蛋白相互作用,增强了发酵乳的硬度、胶黏性和黏度<sup>[39]</sup>。

表6 姜黄牛初乳发酵乳与普通发酵乳的质构性质比较

Table 6 Comparison of texture properties between curcuma colostrum fermented milk and common fermented milk

样品	硬度(N)	弹性(mm)	胶黏性(N)	内聚性	黏度(mJ)
普通发酵乳	0.91±0.06 <sup>a</sup>	4.30±0.01 <sup>a</sup>	0.76±0.07 <sup>a</sup>	0.83±0.05 <sup>a</sup>	0.28±0.02 <sup>b</sup>
姜黄牛初乳发酵乳	0.97±0.08 <sup>a</sup>	3.96±0.05 <sup>b</sup>	0.83±0.03 <sup>a</sup>	0.83±0.02 <sup>a</sup>	0.62±0.04 <sup>a</sup>

### 2.6 姜黄素微胶囊发酵乳抗氧化能力测定

通过测定 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>和羟自由基清除能

力,比较姜黄牛初乳发酵乳和普通发酵乳(不添加姜黄素微胶囊)的抗氧化能力,阳性对照为 V<sub>C</sub>。由如图6可知,随着质量浓度的增加,姜黄牛初乳发酵乳对 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>和羟自由基的清除率增大,其清除能力略低于 V<sub>C</sub>,但明显高于普通发酵乳,在其质量浓度为 25 mg/mL 时,姜黄牛初乳发酵乳对 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>、羟自由基清除率分别为 89.59%、95.39%、63.26%,主要原因是姜黄素是多酚类化合物,本身就是一种强抗氧化剂,与乳酸菌自身的抗氧化性产生协同作用,因此姜黄牛初乳发酵乳表现出更高的抗氧化能力<sup>[40]</sup>。

### 3 结论

以姜黄素微胶囊与牛初乳、鲜牛奶为原料,通过单因素和响应面试验,优化最佳发酵工艺条件为姜黄素微胶囊添加量 0.5%、接种量 2%、牛初乳添加量 30%、蔗糖添加量 6%,其中姜黄素微胶囊添加量对发酵乳感官评分影响最大,此条件下姜黄牛初乳发酵乳感官评分为 91.24,酸度为 88.63 °T,蛋白质含量为 3.98 g/100 g,脂肪含量为 0.46 g/100 g,乳酸菌数 6.59×10<sup>8</sup> CFU/mL,未检出致病菌。姜黄牛初乳发酵乳抗氧化活性比普通发酵乳高,表明添加姜黄素微胶囊可有效提高酸奶的抗氧化活性,有利于实现姜黄素等低水溶性功能因子在酸奶行业的应用,具有良好的发展前景。

### 参考文献

[1] 陶春光. 功能性酸奶研发现状与菌株法律保护体系建立[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 210-213. [TAO C G. Research status of functional yogurt and establishment of legal protection system for bacterial strains[J]. Food research and development, 2017, 38(7): 210-213.]

[2] 肖潇, 王鹏, 邵童, 等. 火麻仁粕蛋白水解液对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 43-47. [XIAO Xiao, WANG Peng, SHAO Tong, et al. Effects of protein hydrolysate of sesame seed meal on quality and antioxidant activity of fermented dairy products[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 43-47.]

[3] GISELA G, MARIA E A, LILIA C, et al. Effect of fermented whey with a probiotic bacterium on gut immune system[J]. Journal of Dairy Research, 2020, 87(1): 134-137.

[4] SAMADRITA S, HEMANTA K, SHANTA D, et al. Hepato-protective effects of synbiotic soy yogurt on mice fed on high cholesterol diet[J]. Nutrition, 2019, 63: 36-44.

[5] DAYANI P, MADHURA J, MAHARSHA E, et al. Cinnamomum zeylanicum and Curcuma longa incorporated dairy yoghurts with hindered glycaemic properties for healthy people[J]. Journal of Future Foods, 2021, 1: 104-112.

[6] 吴小燕. 复配稳定剂在芒果酸奶中的应用及酸奶抑菌作用的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020. [WU X Y. Application of compound stabilizer in mango yogurt and study on antibacterial effect of yogurt[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.]

[7] 王丽爽, 赵秀红. 燕麦膳食纤维酸奶的研制[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(3): 91-95. [WANG Lishui, ZHAO Xiuhong. Development of oat dietary fiber yogurt[J]. Food Research and Development, 2017, 38(3): 91-95.]

[8] 杨希, 叶明. 高钙菊花枸杞酸奶的研制及其体外抗氧化降血

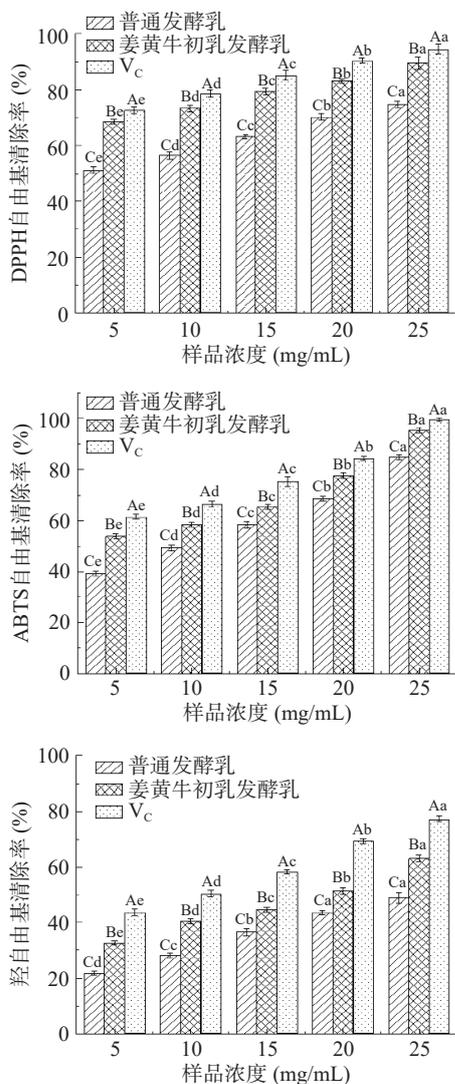


图6 普通发酵乳和姜黄牛初乳发酵乳对 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>和羟基自由基清除率的影响

Fig.6 Effects of common fermented milk and curcuma colostrum fermented milk on DPPH·, ABTS<sup>+</sup> and hydroxyl free radical scavenging rates

- 糖功能[J]. 广西科技大学学报, 2018, 29(3): 108-128. [ YANG X, YE M. Development of high calcium chrysanthemum wolfberry yogurt and its antioxidant and hypoglycemic function *in vitro*[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2018, 29(3): 108-128. ]
- [ 9 ] 温永平, 唐季清, 韩冬, 等. 魔芋甘露寡糖对酸奶免疫调节活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 133-142. [ WEN Yongping, TANG Jiqing, HAN Dong, et al. Effects of konjac mannan oligosaccharides on immunomodulatory activity of yoghurt[J]. Food Science, 2021, 42(17): 133-142. ]
- [ 10 ] SIDNEY J S, OLIVER C, SIDHARTHA D R, et al. Highly bioavailable forms of curcumin and promising avenues for curcumin-based research and application: A review[J]. Molecules, 2020, 25(6): 1397.
- [ 11 ] 张艳, 段雪芹, 高刚, 等. 响应面优化姜黄素的提取工艺及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(6): 269-273. [ ZHANG Yan, DUAN Xueqin, GAO Gang, et al. Study on extraction process and antioxidant activity of curcumin by response surface optimization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(6): 269-273. ]
- [ 12 ] 刘伟, 顾秀竹, 吴筱霓, 等. 姜黄素药理作用的研究进展[J]. 华西药理学杂志, 2021, 36(3): 336-340. [ LIU Wei, GU Xiuzhu, WU Xiaoni, et al. Research progress on pharmacological effects of curcumin[J]. West China Journal of Pharmacy, 2021, 36(3): 336-340. ]
- [ 13 ] LI Y X, MAJJID A Q, SETHUPATHY S, et al. Curcumin production and bioavailability: A comprehensive review of curcumin extraction, synthesis, biotransformation and delivery systems[J]. Industrial Crops & Products, 2021, 172: 114050.
- [ 14 ] VINOD S I, REKHA S S, PADMA V D. An innovative approach using microencapsulated turmeric oleoresin to develop ready-to-use turmeric milk powder with enhanced oral bioavailability[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131400.
- [ 15 ] MASOUMEH A, SEYED H R, SEYED M, et al. Production and characterization of functional flavored milk and flavored fermented milk using microencapsulated canthaxanthin[J]. Accepted Manuscript, 2019, 114.
- [ 16 ] 包洪涛, 骆嘉原, 彭新柔, 等. 松仁油微胶囊酸奶的研制[J]. 中国林副特产, 2022(2): 1-7. [ BAO Hongtao, LUO Jiayuan, PENG Xinrou, et al. Development of pine-kernel oil microcapsule yogurt[J]. China Forest Specialty, 2022(2): 1-7. ]
- [ 17 ] 杨红, 刘爱国, 刘立增, 等. 牛初乳营养成分与其免疫球蛋白活性保持技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 298-303. [ YANG Hong, LIU Aiguo, LIU Lizeng, et al. Research progress on nutrient components and immunoglobulin activity of bovine colostrum[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 298-303. ]
- [ 18 ] PLAYFORD, RAYMOND J, MICHAEL J, et al. Bovine colostrum: Its constituents and uses[J]. Nutrients, 2021, 13(1): 265.
- [ 19 ] 郭瑞峰, 刘少伟, 姚刚. 牛初乳小分子活性肽对小鼠骨密度及脂肪含量的影响研究[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(1): 16-19,24. [ GUO Ruifeng, LIU Shaowei, YAO Gang. Effects of bovine colostrum active peptides on bone mineral density and fat content in mice[J]. China Dairy Industry, 2021, 49(1): 16-19,24. ]
- [ 20 ] MEHRA R, SINGH R, NAYAN V, et al. Nutritional attributes of bovine colostrum components in human health and disease: A comprehensive review[J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100907.
- [ 21 ] 郭瑞峰, 李雪梅, 刘少伟, 等. 牛初乳小分子多肽的分离及其抗菌作用的研究[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(10): 25-28. [ GUO Ruifeng, LI Xuemei, LIU Shaowei, et al. Isolation and antibacterial activity of small molecule polypeptides from bovine colostrum[J]. China dairy industry, 2020, 48(10): 25-28. ]
- [ 22 ] LARCOMBE, SARAH, HUTTON, et al. LYRAS, DENA. Hyperimmune bovine colostrum reduces gastrointestinal carriage of uropathogenic *Escherichia coli*[J]. Human Vaccines & Immunotherapeutics, 2019, 15(2): 508-513.
- [ 23 ] 王青云, 李凯锋, 杨晓波. 牛初乳粉片混合工艺的优化研究[J]. 中国乳业, 2020(7): 73-77. [ WANG Qingyun, LI Kaifeng, YANG Xiaobo. Optimization of mixing technology of bovine colostrum powder[J]. China Dairy Industry, 2020(7): 73-77. ]
- [ 24 ] 梁超, 王青云, 李凯锋. 玫瑰红枣牛初乳冻干粉的研制及其抗氧化活性研究[J]. 现代食品, 2022, 28(2): 85-88,95. [ LIANG Chao, WANG Qingyun, LI Kaifeng. Preparation and antioxidant activity of lyophilized powder of rose jujube and bovine colostrum[J]. Modern Food, 2022, 28(2): 85-88,95. ]
- [ 25 ] 赵存朝, 赵莹萍, 陶亮, 等. 牛初乳粉的研制[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(2): 17-21. [ ZHAO Cunchao, ZHAO Yingping, TAO Liang, et al. Development of bovine colostrum powder[J]. China Dairy Industry, 2017, 45(2): 17-21. ]
- [ 26 ] 权帆, 朱文秀, 张晴, 等. 响应面法优化藜麦发酵酸奶的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 133-139. [ QUAN Fan, ZHU Wenxiu, ZHANG Qing, et al. Optimization of fermentation process of quinoa yoghurt by response surface method[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 133-139. ]
- [ 27 ] JIA R, CHEN H, CHEN H, et al. Effects of fermentation with *Lactobacillus rhamnosus* GG on product quality and fatty acids of goat milk yogurt[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(1): 221-227.
- [ 28 ] 李翔, 蒋方国, 凌云坤, 等. 响应面法优化藜麦核桃酸奶发酵工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(23): 131-136. [ LI Xiang, JIANG Fangguo, LING Yunkun, et al. Optimization of fermentation technology of quinoa walnut yogurt by response surface method[J]. Food Research and Development, 2020, 41(23): 131-136. ]
- [ 29 ] 罗倩. 山葵酸奶加工工艺及其品质研究[D]. 成都: 成都大学, 2019. [ LUO Qian. Study on processing technology and quality of horseradish yogurt[D]. Chengdu: Chengdu University, 2019. ]
- [ 30 ] GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. ]
- [ 31 ] GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. ]
- [ 32 ] GB 5009.239-2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ GB 5009.239-2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. ]
- [ 33 ] GB 4789-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ GB 4789-2016 National Standard for Food Safety. Food microbiological inspection[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. ]
- [ 34 ] GB 19302-2010 食品安全国家标准 发酵乳[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. [ GB 19302-2010 National Standard for Food

Safety. Fermented milk[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.]

[35] 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. [ZHAO Yanyan, ZHAO Shengming, LI Shuai, et al. Effects of polysaccharides from hawthorn leaves on quality and antioxidant activity of fermented dairy products[J]. Food Science, 2020, 41(2): 73-79.]

[36] 童泰怡. 霍山石斛汁功能性酸奶的研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019. [TONG Q Y. Study on functional yogurt of *Dendrobium huoshanense* juice[D]. Wuhu: Anhui University of Technology, 2019.]

[37] 王景晨, 顾瑞霞, 曹荣, 等. 复合中药发酵乳的制备及其体外抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(12): 139-143.

[WANG Jingchen, GU Ruixia, CAO Rong, et al. Preparation and antioxidant activity of compound fermented milk[J]. Food and Fer-

mentation Industries, 2015, 41(12): 139-143.]

[38] 张裕, 王颖, 李志芳, 等. 无糖藜麦发酵乳的物化特性及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 18-22, 92. [ZHANG Yu, WANG Ying, LI Zhifang, et al. Physico-chemical properties and antioxidant activity of sugar-free quinoa fermented milk[J]. Food and Machinery, 2021, 37(10): 18-22, 92.]

[39] DEEPENDRA S, SHILPA V, BRIJ P S. Antioxidative and antimicrobial activity of whey based fermented soy beverage with curcumin supplementation[J]. Indian J Dairy Sci, 2016, 69(2): 171-177.

[40] 罗惠, 常旋, 程昊, 等. 富含鱼油和白藜芦醇的凝固型酸奶制备和分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 202-208. [LUO Hui, CHANG Xuan, CHENG Hao, et al. Preparation and analysis of solidified yogurt rich in fish oil and resveratrol[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(14): 202-208.]