

支莉, 盛美琪, 宋雨蓉, 等. 蓝莓果脯糖浆凝固型酸奶制备工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 183–191. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010208

ZHI Li, SHENG Meiqi, SONG Yurong, et al. Optimization of Preparation Technology of Blueberry Candied Syrup-based Set Yoghurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 183–191. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010208

· 工艺技术 ·

蓝莓果脯糖浆凝固型酸奶制备工艺优化

支莉¹, 盛美琪¹, 宋雨蓉¹, 孙旭¹, 朱礼强¹, 朱成成¹, 魏文毅^{1,2}, 殷泽¹, 金丽梅^{1,3,4,*}, 李志江^{1,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2. 黑龙江省农产品加工工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;

3. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;

4. 国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319)

摘要:以浓缩蓝莓果脯糖浆和全脂灭菌纯牛奶为原料制备凝固型酸奶, 考察了浓缩蓝莓果脯糖浆添加量、白砂糖添加量、发酵剂接种量及发酵时间对凝固型蓝莓酸奶感官品质、乳清析出率和酸度的影响, 并在单因素实验的基础上进行响应面实验, 优化了制备凝固型蓝莓酸奶的最佳工艺参数, 并对市面酸奶分析了其质构参数。结果表明凝固型蓝莓酸奶的最佳制备工艺为: 浓缩蓝莓果脯糖浆 (浓缩 2 倍后总糖含量为 0.679 mg/mL) 的添加量为 7%、白砂糖添加量 4%、发酵剂接种量 0.6%、乳清蛋白粉添加量 2%, 发酵控制时间为 11 h。在此条件下, 乳清析出率为 12.43%, 酸度为 83.66°T, 感官评分达最高值 88.13 分。凝固型蓝莓酸奶呈淡紫色, 具有浓郁的乳香味和蓝莓风味。本产品的硬度、内聚性、胶黏性比市售发酵乳的测定值低, 但持水能力较强, 比添加了增稠剂的市售产品更细腻清爽, 口感较好。本研究确定了蓝莓果脯糖浆凝固型酸奶的基本制备工艺条件, 为提高蓝莓果脯糖浆的综合利用价值、新型果味凝固型酸奶的开发提供了有益的参考。

关键词: 蓝莓, 凝固型酸奶, 糖浆, 响应面, 质构

中图分类号: TS252.54

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)23-0183-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010208

本文网刊:



Optimization of Preparation Technology of Blueberry Candied Syrup-based Set Yoghurt

ZHI Li¹, SHENG Meiqi¹, SONG Yurong¹, SUN Xu¹, ZHU Liqiang¹, ZHU Chengcheng¹,
WEI Wenyi^{1,2}, YIN Ze¹, JIN Limei^{1,3,4,*}, LI Zhijiang^{1,3}

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

2. Agri-food Processing and Engineering Technology Research Center of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China;

3. Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, Daqing 163319, China;

4. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: The concentrated blueberry candied syrup and the whole milk sterilized pure milk were used as raw material to prepare set yoghurt. The influence of addition amount for blueberry candied syrup, sugar content, starter inoculation quantity and fermentation time on the yogurt sensory quality, whey exhalation rate and acidity were investigated. Furthermore, the response surface experiment was carried out on the basis of single factor experiment to optimize the set yoghurt preparation technological parameters. Then the texture parameters of yoghurt were compared with those of commercial yoghurt. The results showed that the optimal preparation technology of blueberry set yoghurt was as follows: The addition amount of concentrate blueberry candied syrup (concentration ratio 2 with the total sugar content 0.679 mg/mL) in the yoghurt 7%, custer sugar 4%, starter inoculation amount 0.6%, whey protein powder 2%, and fermentation control time 11 h. Under these conditions, the whey release rate was 12.43%, the acidity was 83.66°T and the sensory score reached the highest score

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 黑龙江省大学生创新创业训练计划项目 (编号: 202110223019)。

作者简介: 支莉 (2000–), 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: zli_litchi@163.com。

* 通信作者: 金丽梅 (1972–), 女, 博士, 教授, 研究方向: 聚合物膜制备及其应用, E-mail: jilinwa@126.com。

88.13. The blueberry set yoghurt was purple with strong frankincense and blueberry flavor. The hardness, cohesiveness and adhesiveness of this product were lower than those of commercially available fermented milk, but the water holding capacity was stronger. It was more delicate and refreshing, which tasted better than the commercially available products with thickening agent addition. In this study, the basic preparation conditions of set yoghurt of blueberry preserved fruit syrup were determined, which provided useful reference for improving the comprehensive utilization value of blueberry preserved fruit syrup and developing new fruity set yoghurt.

Key words: blueberry; set yoghurt; syrup; response surface; texture

酸奶(yoghurt)是以牛乳为主要原料,添加适量的糖后经杀菌、接种(保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌)、发酵等工序生产的一种乳制品^[1]。食用酸奶可以助消化、调节肠道菌群、促进人体对钙的利用和吸收程度^[2]、改善乳糖不耐受,并有利于提高机体免疫力、降血糖^[3]等。向酸奶中添加果蔬、食品添加剂等制备的产品则为风味酸奶,根据生产工艺的不同可划分为搅拌型酸奶和凝固型酸奶^[1]。其中,搅拌型酸奶的种类繁多,常添加果粒^[4]、谷物^[5]、蜂蜜^[6]等,特别是果蔬复合型酸奶风味多样、营养丰富,深受人们喜爱。

凝固型酸奶通过先灌装后发酵制成,口感细腻醇厚,具有较高的营养价值。然而凝固型酸奶加工过程中容易出现乳清析出和凝乳不结实等问题,因此对原料奶的质量(如蛋白质含量)、发酵温度和时间、菌种、加糖量等均有较严格的要求^[7],酸奶品种相对单一。如果在凝固型酸奶中引入果味物质,如西瓜^[8]、猕猴桃^[9]等,则会对酸奶的凝固性提出更高的要求。添加一定量的稳定剂是提高酸奶凝固性的重要手段之一,常见的稳定剂包括胶类物质如黄原胶、果胶、食用明胶、卡拉胶^[10]等。闫利萍等^[11]以全脂奶粉、草莓果酱作为主要原料,开发出了低热值、具有独特风味的低糖草莓风味酸奶。薛天睿等^[12]综合了周传云等^[13]和唐海尧等^[14]的研究内容,以牛乳为主要原料,将蒲公英汁、橙汁加入其中,研制出了香甜可口、风味浓郁的橙汁蒲公英汁风味酸奶。Guz 等^[15]研究发现南瓜泥的添加可以为酸奶提供丰富的 β -胡萝卜素、维生素 C 与纤维。同时,当蔬菜泥的添加量达到 20% 时,显著提高了酸奶的稠度,使酸奶更稳定。Yildiz 等^[16]将不同蔬菜纤维含量的果蔬,如南瓜、胡萝卜、青豆等添加于酸奶中,结果表明以胡萝卜泥制成的酸奶硬度、黏稠度指数均高于其他果蔬,而南瓜酸奶中总酚、抗坏血酸和总类胡萝卜素含量最高,抗氧化能力最强。综上,将果蔬用于酸奶加工,不仅能够显著提高酸奶的凝固性,改善其质构特性,还能丰富凝固型酸奶的种类并提高其营养价值。

蓝莓作为黑龙江省的特色小浆果,含有丰富的营养物质,如花色苷^[17]、多酚类物质等^[18],其中,花青素具有显著的抗氧化^[19]、增强机体免疫^[20]等生理活性。在蓝莓果脯加工中,经常使用果葡糖浆和白砂糖汲取蓝莓中的水分^[21],同时产生大量的富含糖类物质、果胶、花青素等成分的加工副产物—蓝莓果脯糖浆^[22],目前主要用于加工浓缩蓝莓果汁饮料、蓝莓果

酱等^[23]。由于蓝莓果脯糖浆具有含糖量高、富含胶类物质等特点^[24],将其用于制备凝固型酸奶,有利于增强乳体系的稳定性,提高酸奶的稠度、稳定性、持水性、弹性等^[25]。另外还可为发酵提供大量的糖源,减少额外的糖添加量。此外,将蓝莓中特有的花青素引入酸奶中,可以显著提升酸奶的抗氧化能力,有利于抗衰老、减轻疲劳并提高人们的健康水平,同时对于促进果脯加工副产物—蓝莓果脯糖浆的有效利用和新型果味凝固型酸奶的开发等均具有重要意义。

本文拟以蓝莓果脯糖浆和牛乳为主要原料制备凝固型酸奶,使用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌作为发酵剂,在单因素实验的基础上,通过响应面法进一步优化蓝莓果脯糖浆凝固型酸奶的加工工艺,旨在为新型果味凝固型酸奶的开发提供一定的技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蓝莓果脯糖浆 黑龙江九鑫蓝莓有限公司(总糖含量 1.29 mg/mL);全脂灭菌纯牛奶(乳蛋白 3.2 g/100 mL)、伊利老酸奶 内蒙古伊利实业集团有限公司;白砂糖 食品级市售;乳清蛋白粉 西安全奥生物科技有限公司;保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)、嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*) 北京川秀科技有限公司;完达山蓝莓果粒酸奶 北大荒完达山乳业股份有限公司;氢氧化钠、苯酚、浓硫酸、葡萄糖 天津市大茂化学试剂厂;无水乙醇 辽宁泉瑞试剂有限公司;所有试剂均为分析纯。

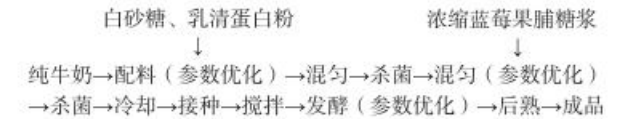
食品级聚丙烯横纹杯标准款 江西俊成实业有限公司;JD100-3B 电子天平 沈阳龙腾电子有限公司;DK-98-IIA 电热恒温水浴锅 天津布泰斯特仪器有限公司;HS-800A 程式恒温恒湿试验机 上海和晟仪器科技有限公司;BCD-610W 电冰箱 博西华家用电器有限公司;SK-1 快速混匀器 金坛市科兴仪器厂;JYC-21HEC05 电磁炉 九阳股份有限公司;RE52CS 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;TD5A-WS 医用离心机 长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司;PHS-3C 数显台式酸度计 上海浦春计量仪器有限公司;TMS-PRO 质构仪 美国 Food Technology Corporation;T6 新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;DGG-9053A 鼓风干燥箱 上海三星实验仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蓝莓果脯糖浆的预处理 以总糖含量为浓缩

标准,将蓝莓果脯糖浆在真空度为 0.05 MPa、转速为 120 r/min、60 ℃ 条件下,旋转蒸发浓缩 2 倍,即总糖含量为 0.679 mg/mL 后,放置冰箱密封备用。

1.2.2 凝固型蓝莓酸奶的制备工艺



量取全脂灭菌纯牛奶 50 mL 于灭菌杯中。分别加入一定量的白砂糖和 2% 的乳清蛋白粉充分搅拌使其溶解,置于 85 ℃^[9] 电热恒温水浴锅中杀菌 14 min,缓慢加入灭菌后的浓缩蓝莓果脯糖浆,将混合乳液置于快速混匀器中充分混匀 2 min,随即再灭菌 1 min,将灭菌混合乳液冷却至 43 ℃。在无菌条件下,将一定量的发酵剂(保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌的比例为 1:1)接种到混合乳液中,充分搅拌均匀后,放入温度 43 ℃ 湿度 50% 的培养箱中发酵^[26]。待其完全凝固后置于 4 ℃ 条件下后熟 12 h。

1.2.3 单因素实验 以 50 mL 全脂灭菌纯牛奶为基准,分别研究浓缩蓝莓果脯糖浆添加量、白砂糖添加量、发酵时间和发酵剂接种量对凝固型蓝莓酸奶感官评分、酸度和乳清析出率的影响。各因素设置如下:浓缩蓝莓果脯糖浆添加量 6%、7%、8%、9%、10%,设定白砂糖添加量 4%,发酵剂接种量 0.6%,发酵时间 10 h;白砂糖添加量 1%、2%、3%、4%、5%,设定浓缩蓝莓果脯糖浆添加量 7%,发酵剂接种量 0.6%,发酵时间 10 h;发酵时间 8、9、10、11、12 h,设定浓缩蓝莓果脯糖浆添加量 7%、白砂糖添加量 4%、发酵剂接种量 0.6%;发酵剂接种量 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%,设定浓缩蓝莓果脯糖浆添加量 7%,白砂糖添加量 4%,发酵时间 10 h。

1.2.4 响应面优化 在上述单因素实验的基础上,选取对凝固型蓝莓酸奶影响显著的浓缩蓝莓果脯糖浆添加量、白砂糖添加量、发酵时间、发酵剂接种量四个因素为响应变量,感官评分为响应值,采用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 模型设计四因素三水平组合响应面分析试验,预测最优凝固型蓝莓酸奶的制备工艺,响应面试验安排见表 1。

表 1 响应面试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

因素	水平		
	-1	0	1
A 浓缩蓝莓果脯糖浆添加量(%)	6	7	8
B 白砂糖添加量(%)	3	4	5
C 发酵时间(h)	9	10	11
D 发酵剂接种量(%)	0.4	0.6	0.8

1.2.5 检测分析方法

1.2.5.1 蓝莓果脯糖浆总糖含量的测定 试样制备:准确称取蓝莓果脯糖浆 1 g(精确到 0.001 g)于 50 mL 容量瓶中,加水定容至 50 mL,充分混匀,将蓝莓果脯

糖浆溶液以 4000 r/min 离心 10 min,取上清液备用。

总糖含量的测定参考蔡红梅等^[27]方法:利用苯酚硫酸法测定总糖含量。

1.2.5.2 感官评定 请 10 名受过感官评定训练的老师和学生(男女比例为 1:1,年龄为 19~50 岁)组成感官评定小组。依照 GB 19302-2010 发酵乳的感官评价标准^[1],从色泽、风味、口感、组织状态对凝固型蓝莓果脯糖浆酸奶进行评价,感官评定的标准见表 2,满分为 100 分,得分结果取 10 人总分的平均值。

表 2 凝固型蓝莓酸奶感官评定标准表

Table 2 Standard for sensory evaluation of blueberry set yogurt

项目	评分标准	分值(分)
色泽 (20分)	色泽均匀,有光泽,呈紫色	16~20
	均匀性较差,稍暗淡,呈淡紫色	9~15
	色泽不均匀,光泽度差,呈淡紫色	0~8
风味 (20分)	奶香和蓝莓香味协调,无异味	16~20
	蓝莓味较淡,气味较协调	9~15
	无蓝莓味,整体气味不协调	0~8
口感 (30分)	口感细腻柔和,酸甜可口	21~30
	口感较好,酸甜较适宜	11~20
	口感粗糙,不柔和,过酸或者过甜	0~10
组织状态 (30分)	组织细腻,质地均匀,凝固性好,无乳清析出	21~30
	组织较细腻,质地均匀,凝固较好,有少量乳清析出	11~20
	组织不均匀,凝乳不良,乳清析出较多	0~10

1.2.5.3 酸奶理化性质的测定 酸奶酸度的测定按照 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准食品酸度的测定》的电位滴定法^[28]。

酸奶乳清析出率的测定^[29]:取 4 ℃ 下酸奶样品于离心管中,4000 r·min⁻¹ 离心 30 min 后,静置 1 min,吸取上清液进行称量,公式如下:

乳清析出率(%) = $\frac{\text{上清液质量}}{\text{样品质量}} \times 100$

酸奶持水能力的测定^[30]:取 4 ℃ 下 10 g 酸奶以 3000 r·min⁻¹ 离心 30 min,将上清液去掉,称取干物质的重量。持水能力(WHC)的计算公式如下:

酸奶持水能力(%) = $\frac{\text{干物质的质量}}{\text{样品质量}} \times 100$

1.2.5.4 酸奶质构测定 使用 FTC TMS-PRO 质构仪,对 4 ℃ 下储存 24 h 的完达山蓝莓果粒酸奶、伊利老酸奶和凝固型蓝莓酸奶进行硬度、内聚性、胶黏性的质构分析。选择 10 mm 球形挤压检测探头,测定条件为:起始力 0.15 N,检测速度 10 mm/min,形变百分量 20%,测试距离 60 mm,感应力 2 N。测定结果取平均值。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据统计与初步处理,SPSS 26.0 对数据进行显著性分析,Origin Pro 9.1 绘制单因素实验折线图,Design-Expert 10.0.7 进行响应面试验设计及分析。实验数据均为三次平行实验的平均值。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 浓缩蓝莓果脯糖浆的添加量对凝固型蓝莓酸奶品质的影响 由图1可知,当浓缩蓝莓果脯糖浆添加量<7%时,凝固型蓝莓酸奶的感官评分和酸度随着浓缩蓝莓果脯糖浆的添加而升高,乳清析出率随之下降。这是由于浓缩蓝莓果脯糖浆中的糖源能刺激乳酸菌生长^[31],使其产酸能力增强,酸奶形成的胶凝结构更加稳定。当浓缩蓝莓果脯糖浆添加量为7%时,凝固型蓝莓酸奶的乳清析出率降低到16.63%,酸度为87.25°T,感官评分达最高值84.11分,此时酸奶的组织状态均一稳定,色泽明亮,口感最佳。浓缩蓝莓果脯糖浆添加量>7%,此时酸奶的酸度继续下降,乳清析出率先下降后快速上升,虽然浓缩蓝莓果脯糖浆添加量为8%时的乳清析出率最低,但感官评分和酸度均低于浓缩蓝莓果脯糖浆添加量为7%时的感官评分和酸度值。且当浓缩蓝莓果脯糖浆添加量>8%后,酸度快速下降到70°T以上,接近凝固型酸奶的常见酸度控制范围(70~95°T)^[32-33]的下限,由于浓缩蓝莓果脯糖浆添加量过多,使酸奶中糖源浓度及有机酸含量过大,当pH超过酪蛋白的等电点(pH5.03)时,酪蛋白胶束不稳定,乳酸又降低蛋白质的亲水性抑制了乳酸菌的发酵^[34],且浓缩蓝莓果脯糖浆中的单宁类物质会影响酸奶口感,使感官评分明显下降。因此,选取浓缩蓝莓果脯糖浆最佳添加量为7%。

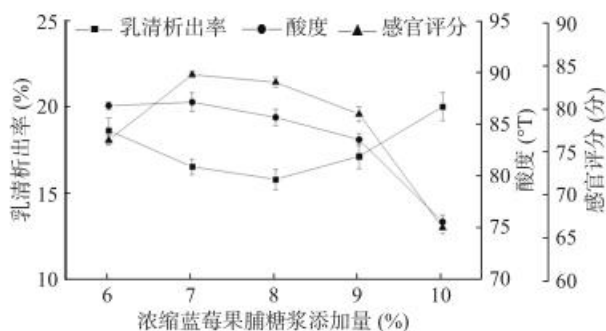


图1 浓缩蓝莓果脯糖浆添加量对酸奶品质的影响

Fig.1 Effect of concentrated blueberry candied syrup addition amount on the quality of yoghurt

2.1.2 白砂糖添加量对凝固型蓝莓酸奶品质的影响

由于浓缩蓝莓果脯糖浆提供了丰富的碳源,可以减少酸奶中额外糖的添加量,因此本实验白砂糖的添加量控制在1%~5%之间,略低于传统酸奶常见白砂糖添加量范围(6%~10%)^[35]。由图2可知,当白砂糖的添加量越少,凝固型蓝莓酸奶的酸度和感官评分越低,乳清析出率越大,可能是因为白砂糖越少,碳源浓度较低,导致酸奶发酵不彻底^[36],此时酸奶组织状态差,且总体口感不够爽滑,状态稀薄,风味不易被接受。当白砂糖添加量为4%时,酸度达最大值88.05°T,乳清析出率为最低值17.12%,感官评分为81.89分,酸奶的组织状态最好,色泽明亮,味道最佳,有浓郁的

蓝莓奶香味,但此时酸奶的感官评分略低于白砂糖添加量为3%时的感官评分,这是因为此时酸奶的口感比白砂糖添加量为3%时略甜,酸甜不协调,感官评分下降。白砂糖添加量>4%时,酸奶的组织状态变差,乳清析出率升高,口感逐渐变甜,酸味减弱。这主要是白砂糖含量过高会导致乳体系中渗透压升高,导致发酵菌体内水分渗出,使其缺水死亡,这不仅不会有助于酸奶的发酵,反而会部分抑制发酵^[36]。适量的白砂糖可为发酵提供部分碳源,使单位面积内乳酸菌发酵活力上升。因此,白砂糖添加量最佳值为4%。

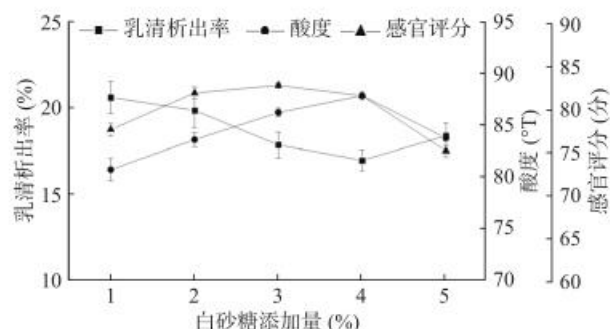


图2 白砂糖添加量对酸奶品质的影响

Fig.2 Effect of sugar addition amount on the quality of yoghurt

2.1.3 发酵时间对凝固型蓝莓酸奶品质的影响

由图3可知,发酵时间由8h上升到10h时,凝固型蓝莓酸奶的感官评分和酸度随之升高,乳清析出率随之下降,这可能是由于发酵初期时间短,乳酸菌活力不足,产酸能力弱^[37],造成了凝固型蓝莓酸奶形成的胶凝结构不坚固,但随着发酵时间的延长,乳酸菌数量不断上升,产酸能力随之提升。发酵时间为10h时,感官评分最高为84.16分,乳清析出率最低为16.27%,酸度为85.52°T,此时凝固型蓝莓酸奶的组织状态均一稳定,口感饱满,风味协调。由于浓缩蓝莓果脯糖浆可溶性固形物含量高,乳中总固体成分的增加改变了乳酸菌所能利用的水分活度值(A_w)^[38],乳酸菌生长缓慢,导致本产品发酵时间比一般酸奶发酵时间长。发酵时间>10h时,凝固型蓝莓酸奶出现组织状态变差,稳定性降低,口感偏酸的现象,其感官评分随之下降,酸奶乳清析出率呈上升趋势,酸度随之上升,这可能是由于凝固型蓝莓酸奶发酵时间过长,导致乳酸菌利用乳体系中的浓缩蓝莓果脯糖浆提供的碳源

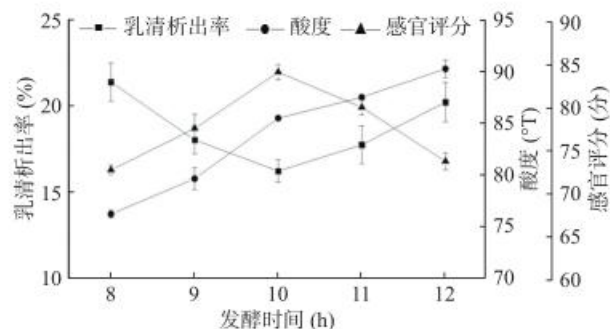


图3 发酵时间对酸奶品质的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on the quality of yoghurt

进一步发酵产酸,使乳体系原本形成的三维网络结构被破坏^[39]。因此,选取发酵时间最佳值为 10 h。

2.1.4 发酵剂接种量对凝固型蓝莓酸奶品质的影响

由图 4 可知,当发酵剂接种量<0.6% 时,凝固型蓝莓酸奶感官评分和酸度较低,乳清析出率较高,这是由于乳酸菌数目较少,发酵不完全,不足以使酸奶发酵形成坚固的凝胶结构^[40],导致酸奶组织状态松散,酸奶味不够明显,口感不饱满。发酵剂接种量 0.6% 时,感官评分最高为 82.47 分,酸度为 83.54°T,乳清析出率为 16.24%,此时酸奶的组织状态最佳,口感最好,色泽明亮,蓝莓奶香味明显。发酵剂接种量>0.6% 时,凝固型蓝莓酸奶的感官评分逐渐下降,酸度快速上升,此时酸奶的组织状态差,有较多乳清析出,口感偏酸,这是由于发酵剂接种量过多使酸奶酸化速度过快,单位面积内乳酸菌^[41]数目大量增加,使酸奶发酵不稳定,酸奶组织状态差,酸度迅速增加,并伴有大量乳清析出。因此,选取发酵剂接种量最佳为 0.6%。

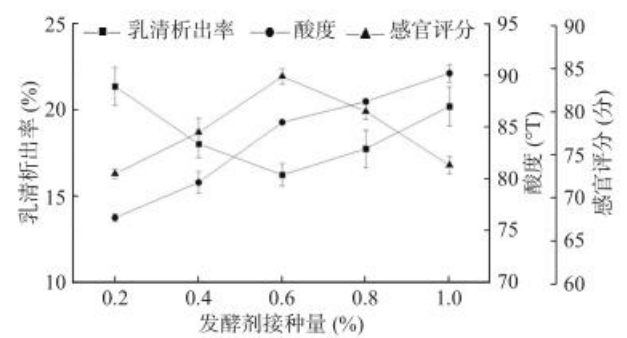


图 4 发酵剂接种量对酸奶品质的影响
Fig.4 Effect of inoculating addition of starter on the quality of yoghurt

2.2 响应面实验

2.2.1 响应面实验设计与结果 经过单因素实验,选取对酸奶影响显著的浓缩蓝莓果脯糖浆添加量、白砂糖添加量、发酵时间、发酵剂接种量四个因素为自变量,以各因素最优值为中间参数,采用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 模型设计四因素三水平组合响应面分析试验^[42],对凝固型蓝莓酸奶的工艺进行优化,结果见表 3、表 4。

各因素对感官评分(Y)的响应回归方程为 $Y=87.52-0.84A-0.66B+0.79C+0.64D+0.94AB-0.88AC+1.03AD-0.57BC+0.93BD+0.57CD-4.08A^2-2.08B^2-0.86C^2-1.81D^2$ 。该回归模型 $P<0.01$,模型极显著,失拟项 $P>0.05$,失拟项不显著,说明该模型用于凝固型蓝莓酸奶的工艺优化具有可靠性。由表 4 可知,因素 A、C、 A^2 、 B^2 、 D^2 对感官评分极显著($P<0.01$),因素 B、D、AB、AD、BD、 C^2 对感官评分显著($P<0.05$),AC、BC、CD 对感官评分不显著($P\geq 0.05$),说明各因素对凝固型蓝莓酸奶的影响排序为: A 浓缩蓝莓果脯糖浆添加量>C 发酵时间>B 白砂糖添加量>D 发酵剂接种量,即浓缩蓝莓果脯糖浆添加量对酸奶影响最显著。

表 3 响应面实验设计及结果

Table 3 Experimental design and results for response surface experiment

试验号	A浓缩蓝莓果脯糖浆添加量	B白砂糖添加量	C发酵时间	D发酵剂接种量	Y感官评分(分)
1	0	-1	0	1	84
2	1	0	-1	0	81.67
3	-1	0	1	0	84.5
4	-1	-1	0	0	83.67
5	-1	0	0	-1	83.66
6	0	0	-1	-1	84.22
7	0	1	0	1	83.67
8	-1	0	-1	0	81.19
9	0	1	1	0	85.67
10	0	0	0	0	88.67
11	-1	1	0	0	80.23
12	0	0	0	0	87.27
13	0	0	0	0	87
14	0	0	1	-1	83.78
15	-1	0	0	1	82.89
16	0	0	0	0	87.33
17	1	1	0	0	80.65
18	0	0	-1	1	84.5
19	0	-1	-1	0	83.36
20	0	-1	0	-1	84.73
21	1	0	1	0	81.47
22	0	-1	1	0	87
23	0	0	0	0	87.33
24	1	0	0	1	82.67
25	0	1	0	-1	80.67
26	1	-1	0	0	80.33
27	0	1	-1	0	84.33
28	1	0	0	-1	79.33
29	0	0	1	1	86.33

表 4 回归方程方差分析结果

Table 4 Variance analysis of quadratic polynomial regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	167.51	14	11.97	17.86	<0.0001	**
A	8.37	1	8.37	12.49	0.0033	**
B	5.16	1	5.16	7.71	0.0149	*
C	7.49	1	7.49	11.18	0.0048	**
D	4.90	1	4.90	7.32	0.0171	*
AB	3.53	1	3.53	5.28	0.0376	*
AC	3.08	1	3.08	4.60	0.0500	
AD	4.22	1	4.22	6.30	0.0249	*
BC	1.32	1	1.32	1.97	0.1818	
BD	3.48	1	3.48	5.19	0.0389	*
CD	1.29	1	1.29	1.92	0.1872	
A ²	108.11	1	108.11	161.39	<0.0001	**
B ²	27.96	1	27.96	41.74	<0.0001	**
C ²	4.83	1	4.83	7.20	0.0178	*
D ²	21.22	1	21.22	31.68	<0.0001	**
残差	9.38	14	0.67			
失拟项	7.65	10	0.77	1.77	0.3059	不显著
纯误差	1.73	4	0.43			
总离差	176.89	28				

注: $R^2=0.9470$; 显著性: *代表差异显著, $P<0.05$; **代表差异极显著, $P<0.01$ 。

2.2.2 各因素交互作用的响应曲面图分析 为进一步考察各因素交互作用对凝固型蓝莓酸奶感官评分

的影响,对其等高线图和响应曲面图进行分析,见图 5。随着各因素数值升高,凝固型蓝莓酸奶感官评分呈现先上升后下降的趋势。等高线图越接近椭圆,响应曲面图倾斜度越高,说明两者交互作用越显著^[43]。其中浓缩蓝莓果脯糖浆添加量(A)和发酵剂接种量(D)的交互作用等高线图椭圆特征明显,响应面图倾斜度最大,因此二者的交互作用对感官评分的影响最显著。以感官评分最大值为最优参数,确定了凝固型蓝莓酸奶最佳制备工艺为:浓缩蓝莓果脯糖浆添加量 6.81%、白砂糖添加量 3.74%、发酵时间 10.69 h、发酵剂接种量 0.63%,在此工艺条件下得到凝固型蓝莓酸奶的感官评分为 88.01 分。

2.2.3 最优方案试验 为验证响应面试验的预测结果,并考虑实际工艺条件,调整凝固型蓝莓酸奶最佳

制备工艺条件为:浓缩蓝莓果脯糖浆添加量 7%、白砂糖添加量 4%、发酵时间 11 h、发酵剂接种量 0.6%。在此工艺条件下制备凝固型蓝莓酸奶,重复 3 次测定并取平均值,得感官评分为 88.13 分,与预测值接近,其乳清析出率为 12.43%,酸度为 83.66°T,证明该制备工艺条件对凝固型蓝莓酸奶发酵具有可行性。

2.3 品质对比

酸奶的质构特性是反映酸奶品质的重要指标,同时也影响到人们对酸奶的接受程度^[44]。另外,酸奶的持水能力也反映了酸奶质地和乳清析出能力。按上述最优工艺参数制备凝固型蓝莓酸奶后进行质构与持水能力分析,并与两种市售酸奶进行对比,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,本实验样品的硬度、内聚性、胶黏

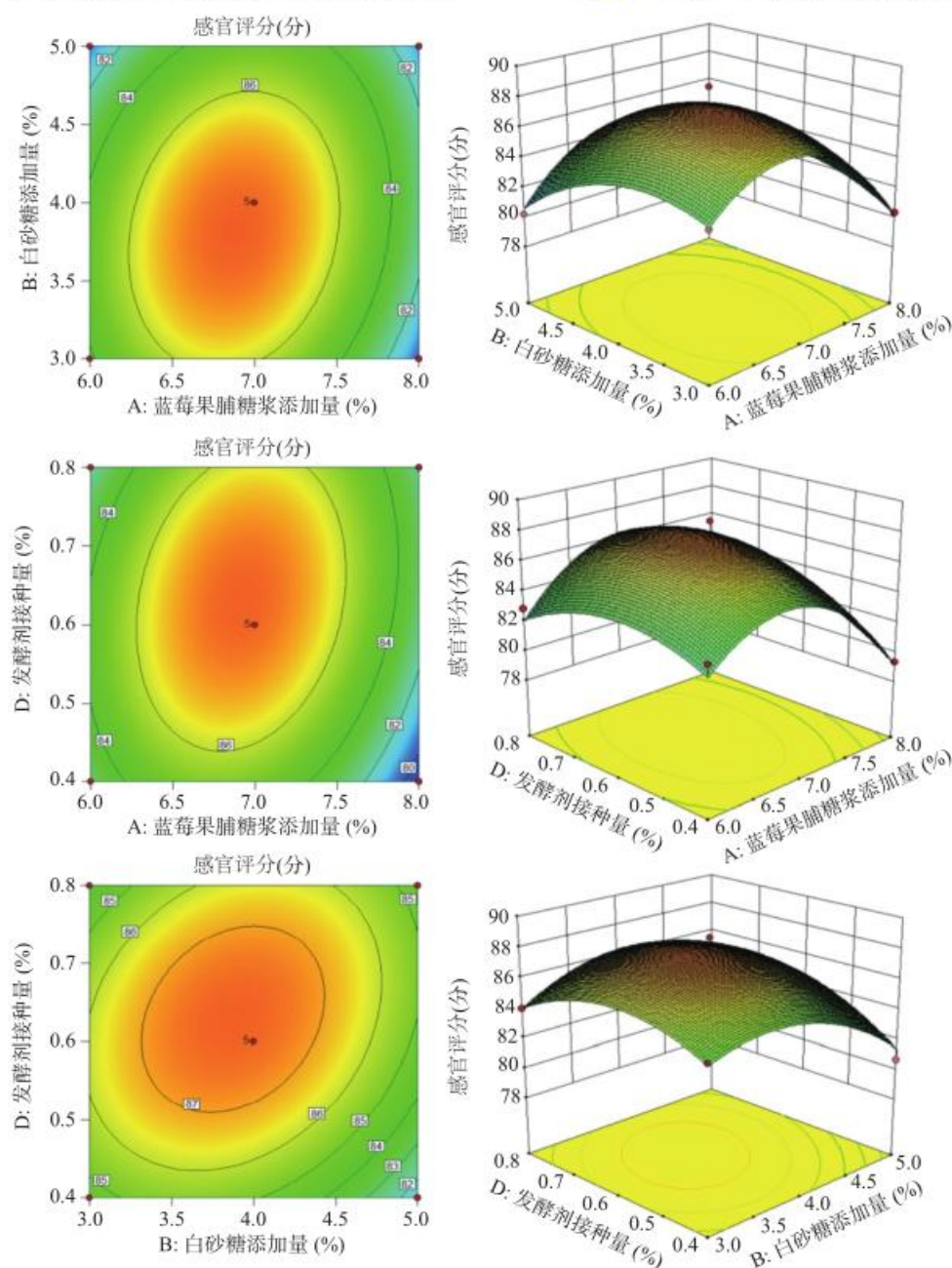


图 5 各因素交互影响凝固型蓝莓酸奶感官评分的等高线图和响应曲面图

Fig.5 The contour diagram and response surface diagram of sensory score of blueberry yogurt influenced by each factor

表 5 市售发酵酸奶与本样品的品质对比

Table 5 Comparison of texture properties between commercial set yogurt and the sample in this work

酸奶种类	硬度(N)	内聚性	胶黏性(N)	持水能力(%)
完达山蓝莓果粒酸奶	0.79±0.22 ^a	0.85±0.12 ^a	0.68±0.12 ^a	87.91±0.51 ^c
伊利老酸奶	0.78±0.16 ^a	0.85±0.14 ^a	0.66±0.16 ^a	98.03±0.64 ^a
本样品	0.38±0.12 ^b	0.42±0.09 ^b	0.28±0.11 ^b	94.28±0.36 ^b

注: 表中同一列不同上标a、b、c表示显著性差异, $P < 0.05$ 。

性分别为 0.38 N、0.42 和 0.28 N, 均比市售凝固型酸奶的相应测定值低, 这是由于市售酸奶中通常加入增稠剂、乳化剂等食品添加剂改善酸奶品质^[45]。如单、双甘油脂肪酸酯此类乳化剂能够提高乳浊液的稳定性, 因此它固定自由水的能力高, 酸奶制作中加入会使其持水性增强, 降低乳清析出率。明胶、羟丙基二淀粉磷酸酯此类增稠剂则可以提高物系黏度, 促进形成凝胶。而本文研制的酸奶中没有加入增稠剂, 完全是由于浓缩蓝莓果脯糖浆的加入促进了酸奶体系凝胶的形成, 因此硬度等值相对较低。但由于浓缩蓝莓果脯糖浆中的固形物, 如果胶等物质可以改变水合行为, 有利于稳定蛋白质网络和固定自由水^[46], 因此本产品与添加了增稠剂的市售产品相比, 持水能力较高, 且更细腻醇厚, 同时保持较好的清爽口感。

3 结论

本研究确定了蓝莓果脯糖浆凝固型酸奶的基本发酵工艺条件, 在单因素实验基础上进行响应面设计优化, 得到了具有可靠性的各因素对感官评分的响应回归方程, 通过实验确定了凝固型蓝莓酸奶最佳制备工艺参数: 浓缩蓝莓果脯糖浆(总糖含量为 0.679 mg/mL)添加量 7%、白砂糖添加量 4%、发酵时间 11 h、发酵剂接种量 0.6%, 在此条件下生产的酸奶呈淡紫色, 组织状态均匀、酸甜适宜且具有浓郁的乳香味和蓝莓风味, 感官评分为 88.13 分。同时本产品与市售产品相比, 持水能力较高, 且更细腻醇厚, 具有清爽口感。

参考文献

[1] 中华人民共和国卫生和计划生育委员会. 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. [National Health and Family Planning Commission of the P. R. C. GB 19302-2010 National food safety standard fermented milk[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.]

[2] 韩喜艳, 宋菲, 赵松林, 等. 椰子植物酸奶制备工艺优化研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(20): 55-62. [HAN Xiyen, SONG Fei, ZHAO Songlin, et al. Study on the optimization of preparation technology of coconut yoghurt[J]. Food Research and Development, 2021, 42(20): 55-62.]

[3] 韩永佳. 功能型酸奶的理化特性、抗氧化活性及微观结构的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. [HAN Yongjia. Study on physicochemical properties, antioxidant activity and microstructure of functional yoghurt[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.]

[4] 陈文硕, 李全阳, 闭秋华, 等. 搅拌型芒果果粒水牛酸乳制作工艺及其优化途径的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 289-293, 298. [CHEN Wenshuo, LI Quanyang, BI Qiuhua, et al. Study on the process and optimization of stirred buffalo yoghurt with mango fruit granule[J]. Food Industry Science and Technology, 2012, 33(12): 289-293, 298.]

[5] 潘廷跳, 庞杰, 刘福林. 搅拌型燕麦酸奶的研制[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(12): 56-58. [PAN Tingtiao, PANG Jie, LIU Fulin. Development of stirred oat yoghurt[J]. Chinese Dairy Industry, 2010, 38(12): 56-58.]

[6] 王丽丽, 宝音德力格尔. 蜂蜜搅拌型酸奶的研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(8): 240-241. [WANG Lili, Boyindelger. Study on honey stirred yoghurt[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 240-241.]

[7] 谢继志. 影响酸奶质量的因素及其品质控制[J]. 农牧产品开发, 2001(3): 12-15. [XIE Jizhi. Factors affecting yoghurt quality and its quality control[J]. Agricultural and Animal Husbandry Product Development, 2001(3): 12-15.]

[8] 陈涛. 凝固型蟠桃西瓜菠萝复合酸奶制作工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(6): 2685-2686. [CHEN Tao. Study on preparation technology of solidified flat peach watermelon pineapple compound yoghurt[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(6): 2685-2686.]

[9] 李铁欣, 史东辉, 付莉. 凝固型猕猴桃酸奶配方优化的研究[J]. 中国奶牛, 2010(7): 52-54. [LI Yixin, SHI Donghui, FU Li. Study on formula optimization of solidified kiwi yoghurt[J]. China Dairy Cattle, 2010(7): 52-54.]

[10] HIMASHREE P, SENGAR A S, SUNIL C K. Food thickening agents: Sources, chemistry, properties and applications-A review[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 27(3): 100468.

[11] 闫利萍, 王能军, 陈博文, 等. 低糖草莓风味酸奶研制[J]. 蚌埠学院学报, 2022, 11(2): 1-6. [YAN Liping, WANG Nengjun, CHEN Bowen, et al. Development of low-sugar strawberry flavored yogurt[J]. Journal of Bengbu University, 2022, 11(2): 1-6.]

[12] 薛天睿, 李晋. 鲜橙蒲公英风味酸奶的研制[J]. 中国乳业, 2022(2): 100-104. [XUE Tianrui, LI Jin. Preparation of orange dandelion flavored yoghurt[J]. Dairy Industry, 2022(2): 100-104.]

[13] 周传云, 王运亮, 庖麟, 等. 蒲公英酸奶的研制及其抑菌效果的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2008(3): 13-17. [ZHOU Chuanyun, WANG Yunliang, HU Lin, et al. Study on the dandelion yogurt production and its effect of inhibition on bacteria[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2008(3): 13-17.]

[14] 唐海尧, 黄慧强, 陈雅萍, 等. 橙汁酸奶工艺配方研究[J]. 农产品加工, 2019(17): 27-29. [TANG Haiyao, HUANG Huiqiang, CHEN Yaping, et al. Study on the technological formula of orange yoghurt[J]. Farm Products Processing, 2019(17): 27-29.]

[15] GUZ E A, NOVITSKAYA E G, KALENIK T K, et al. The influence of vegetable puree containing carotenoids on the nutrient composition and structure of milk yoghurt[J]. International Journal of Dairy Technology, 2018, 71(1): 89-95.

[16] YILDIZ E, OZCAN T. Functional and textural properties of vegetable-fibre enriched yoghurt[J]. International Journal of Dairy

Technology, 2019, 72(2): 199-207.

[17] YILDIZ E, GULDAS M, ELLERGEZEN P, et al. Obesity-associated pathways of anthocyanins[J]. Food Science and Technology, 2022, 41: 1-13.

[18] TANAKA T, MATSUO Y. Production mechanisms of black tea polyphenols[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 2020, 68(12): 1131-1142.

[19] ŠUMIC Z M, TEPIC A N, MALBASA R V, et al. Optimization of frozen wild blueberry vacuum drying process[J]. Chemical Industry/Hemijaska Industrija, 2015, 69(1): 77-84.

[20] ZHENG X, ZHANG Z, JIN C, et al. Purification characteristics and parameters optimization of anthocyanin extracted from blueberry[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(2): 135-144.

[21] 王春荣, 尹德斌, 文连奎. 蓝莓果脯加工工艺研究[J]. 农产品加工(学刊), 2012(4): 70-76. [WANG Chunrong, YIN Debin, WEN Liankui. Study on processing technology of blueberry preserved fruit[J]. Agricultural Processing (Journal), 2012(4): 70-76.]

[22] 李斌, 矫馨瑶, 孟宪军, 等. 蓝莓果脯真空渗糖工艺研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(5): 552-558. [LI Bin, JIAO Xinyao, MENG Xianjun, et al. Optimization of vacuum sugar permeability technology on preserved blueberry fruits by response surface methodology[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(5): 552-558.]

[23] 王少娟, 党娅, 赵桦. 蓝莓果酱加工工艺技术研究[J]. 黑龙江农业科学, 2016(7): 102-107. [WANG Shaojuan, DANG Ya, ZHAO Ye. Study on processing technology of blueberry jam[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(7): 102-107.]

[24] 景慧, 张艳平. 大豆分离蛋白麦芽糊精 NaCl 和亲水胶体对羊肉持水性能的影响[J]. 农产品加工(学刊), 2007, 11: 43-45. [JING Hui, ZHANG Yanping. Effects of soybean protein isolate maltodextrin NaCl and hydrophilic colloid on water retention of mutton[J]. Agricultural Processing (Journal), 2007, 11: 43-45.]

[25] 李博, 孙玥, 梅俊. 草莓汁对低脂酸奶品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 191-195. [LI Bo, SUN Yue, MEI Jun. Effect of strawberry juice on the quality of low fat yoghurt[J]. The Food Industry, 2020, 41(1): 191-195.]

[26] 孔凡平, 郎秀杰, 郭成宇. 凝固型双蛋白酸奶的发酵配方优化[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 47-52. [KONG Fanping, LANG Xiujie, GUO Chengyu. Optimization of fermentation formula of solidified double protein yoghurt[J]. The Food Industry, 2021, 42(1): 47-52.]

[27] 蔡红梅, 田子玉. 苯酚-硫酸法测定草莓中总糖含量[J]. 吉林农业, 2019(4): 46. [CAI Hongmei, TIAN Ziyu. Determination of total sugar content in strawberry by phenol-sulfuric acid method[J]. Jilin Agriculture, 2019(4): 46.]

[28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.239-2016 食品安全国家标准食品酸度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the P. R. C. GB 5009.239-2016 National standard for food safety Determination of acidity of foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[29] 温研, 赵新淮. 牛乳的过氧化物酶处理与凝固型酸奶品质的变化[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(2): 41-45. [WEN Yan,

ZHAO Xinhui. Effects of peroxidase treatment on quality of solidified yoghurt[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(2): 41-45.]

[30] 吴小艳, 刘忠义, 刘文星, 等. 复配稳定剂稳定芒果酸奶凝胶结构的作用机理[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 1082-1091.

[WU Xiaoyan, LIU Zhongyi, LIU Wenxing, et al. Compound stabilizer stable structure mango yogurt curd mechanism[J]. Journal of Zhejiang Agricultural, 2020, 32(6): 1082-1091.]

[31] 熊政委, 王文佳, 温瑞, 等. 响应面法优化菊糖酸奶的发酵工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 156-160. [XIONG Zhengwei, WANG Wenjia, WEN Rui, et al. Optimization of fermentation process of inulin yoghurt by response surface methodology[J]. Food Science, 2014, 35(13): 156-160.]

[32] 黄强, 俞琳, 赵广生, 等. 发酵条件对凝固型酸奶质地影响的研究[J]. 浙江科技学院学报, 2013, 25(6): 441-446. [HUANG Qiang, YU Lin, ZHAO Guangshen, et al. Effect of fermentation conditions on texture of solidified yoghurt[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2013, 25(6): 441-446.]

[33] 石月锋, 杨海燕. 凝固型酸奶在储存过程中的特性研究[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(5): 72-74. [SHI Yuefeng, YANG Haiyan. Study on the characteristics of solidified yoghurt during storage[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(5): 72-74.]

[34] 陈新建. 大豆酸奶的质构性能及机理研究[J]. 广东工业大学学报, 2001(2): 76-80. [CHEN Xinjian. Study on texture properties and mechanism of soybean yoghurt[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2001(2): 76-80.]

[35] 罗玲泉, 刘成国. 无蔗糖酸奶的研制[J]. 中国奶牛, 2007(2): 33-36. [LUO Lingquan, LIU Chengguo. Development of sugar-free yoghurt[J]. China Dairy Cows, 2007(2): 33-36.]

[36] 谢艳华, 刘金康, 汝馨, 等. 金针菇凝固型酸奶工艺条件优化研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(12): 172-175. [XIE Yanhua, LIU Jinkang, RU Qing, et al. Study on the process optimization of flammulina velutipes solidified yoghurt[J]. China Brewing, 2017, 36(12): 172-175.]

[37] 潘越博. 凝固型酸奶质量控制措施[J]. 中国乳业, 2010(4): 96-97. [PAN Yuebo. Quality control measures of coagulated yoghurt[J]. China Dairy Industry, 2010(4): 96-97.]

[38] 郭清泉, 张兰威, 林淑英. 酸奶发酵机理及后酸化控制措施[J]. 食品与发酵工业, 2001(2): 80-83. [GUO Qingquan, ZHANG Lanwei, LIN Shuying. Mechanism of yoghurt fermentation and control measures of post-acidification[J]. Food and Fermentation Industry, 2001(2): 80-83.]

[39] 樊晓艳. 凝固型酸乳乳清析出的原因及控制措施[J]. 现代食品, 2016(8): 57-59. [FAN Xiaoyuan. Causes of whey precipitation in coagulated sour milk and its control measures[J]. Modern Food, 2016(8): 57-59.]

[40] 李玲玲, 罗学凤, 张灿, 等. 红枣南瓜凝固型酸奶的发酵工艺研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 28-31. [LI Lingling, LUO Xuefeng, ZHANG Chan, et al. Study on fermentation technology of coagulated yoghurt of red date pumpkin[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 28-31.]

- [41] 党玲,程楠楠. 响应面优化亚麻籽油凝固型酸奶的制备工艺[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(10): 92-95, 103. [DANG Ling, CHENG Nannan. Response surface optimization for the preparation of flaxseed oil solidified yoghurt[J]. *Cereals Oils*, 2021, 34(10): 92-95, 103.]
- [42] 李丽,李昌宝,盛金凤,等. 凝固型火龙果酸奶的制备工艺及质构特性研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(11): 176-180. [LI Li, LI Changbao, SHENG Jinfeng, et al. Study on preparation technology and texture properties of solidified pitaya yoghurt[J]. *China Brewing*, 2016, 35(11): 176-180.]
- [43] 王晓琴,曹宝明,张芬琴. 响应曲面法优化黄参酸奶生产工艺[J]. *食品科学*, 2011, 32(12): 39-44. [WANG Xiaoqin, CAO Baoming, ZHANG Fenqin. Optimization of production technology of huangshen yoghurt by response surface methodology[J]. *Food Science*, 2011, 32(12): 39-44.]
- [44] 陈文璐,刘妍妍,巩燕妮. 响应面法优化干酪风味发酵乳的发酵工艺[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(23): 235-242. [CHEN Wenlu, LIU Yanyan, GONG Yanni. Optimization of fermentation technology of cheese flavor fermented milk by response surface methodology[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(23): 235-242.]
- [45] 张国栋,马力,潘晓亚,等. 增稠剂对凝固型酸奶品质的影响研究[J]. *中国乳品工业*, 2005(7): 31-32, 44. [ZHANG Guodong, MA Li, PAN Xiaoya, et al. Study on the effect of thickener on the quality of coagulated yoghurt[J]. *China Dairy Industry*, 2005(7): 31-32, 44.]
- [46] MIR M B, RASTOGI S, HARIPRIYA S. Optimization of process variables for the preparation of almond gum incorporated set-yogurt using Box-Behnken response surface model[J]. *Applied Food Research*, 2021, 1(2): 2722-5022.