

# 枸杞酸奶的制备、质构品质和风味物质分析

罗叶名<sup>1,2</sup>, 傅虹飞<sup>1</sup>, 索朗嘉措<sup>1</sup>, 周元<sup>1\*</sup>

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2.铜仁市检验检测院, 贵州铜仁 554300)

**摘要:** 该研究以枸杞浆、纯牛奶为主要原料, 采用单因素试验和正交试验优化枸杞酸奶的配方和发酵条件, 同时采用物性测定仪测定其质构参数, 并采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用仪测定其挥发性风味物质组成和含量。结果表明, 最佳枸杞酸奶配方为: 以纯牛奶为基准(质量分数), 枸杞浆添加量 5%, 奶粉添加量 3%, 蔗糖添加量 10%, 发酵剂添加量 0.1%, 42 °C 条件下发酵 8 h, 其感官评分为 85.2 分, 硬度 28.32 g, 稠度 379.31 g·sec, 粘聚性 -18.35 g, 粘度指数 -16.98 g·sec, 酸度值 100.20 °T。相关性分析表明, 枸杞酸奶的硬度与色泽和组织状态呈极显著负相关 ( $r<0.001$ ), 稠度与口感呈极显著正相关 ( $r<0.01$ ), 色泽和组织状态呈极显著正相关 ( $r<0.001$ ), 组织状态和风味呈显著正相关 ( $r<0.05$ ), 以及风味与口感呈极显著正相关 ( $r<0.001$ )。枸杞酸奶含有 32 种挥发性风味物质, 含量为 1 417.09  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。枸杞浆中的醛类等是枸杞酸奶中枸杞风味主要来源。研发的枸杞酸奶色泽柔和, 质地均匀, 稠度适中, 口感细腻, 酸甜适宜, 兼顾营养和风味。

**关键词:** 枸杞酸奶; 工艺优化; 质构品质; 风味物质

文章编号: 1673-9078(2024)01-249-261

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0067

## Preparation and Analyses of Textural Quality and Flavor Substances of Goji Berry Yoghurt

LUO Yeming<sup>1,2</sup>, FU Hongfei<sup>1</sup>, SUOLANG Jiacao<sup>1</sup>, ZHOU Yuan<sup>1\*</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(2.Tongren Inspection and Testing Institute, Tongren 554300, China)

**Abstract:** Goji berry puree and pure milk were chosen as the main raw materials, and the formula and fermentation conditions of goji berry yogurt were optimized by single factor tests and orthogonal experiments. Texture parameters of the yoghurts were determined by a physical property analyzer, while their composition and content of volatile flavor substances were analyzed by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry. The results showed that the optimal formula of goji berry yogurt was as follows (on basis of the pure milk (mass fraction): goji berry puree, 5%; milk powder, 3%; sucrose, 10%; starter culture, 0.1%, fermentation temperature, 42 °C; fermentation, 8 h. The sensory score for the optimized goji berry yogurt was 85.2, with the firmness as 28.32 g, consistency as 379.31 g·sec, cohesiveness as -18.35 g, viscosity

引文格式:

罗叶名,傅虹飞,索朗嘉措,等.枸杞酸奶的制备、质构品质和风味物质分析[J].现代食品科技,2024,40(1):249-261.

LUO Yeming, FU Hongfei, SUOLANG Jiacao, et al. Preparation and analyses of textural quality and flavor substances of goji berry yoghurt [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 249-261.

收稿日期: 2023-01-19

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBNY-169); 西北农林科技大学中央高校基本科研业务费 (2452015067)

作者简介: 罗叶名 (1996-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 食品检验检测, E-mail: 1261358031@qq.com

通讯作者: 周元 (1979-), 女, 博士, 高级实验师, 研究方向: 果蔬加工研究, E-mail: yuan0114@163.com

index as -16.98 g·sec, and acidity as 100.20 °T. The correlation analysis showed that the firmness of the goji berry yoghurt was significantly and negatively correlated with the color and tissue status ( $r<0.001$ ), and the consistency was positively correlated with the taste sensation ( $r<0.01$ ), the color was significantly and positively correlated with the tissue status ( $r<0.001$ ), the tissue status was significantly and positively correlated with the flavor ( $r<0.05$ ), and the flavor was significantly and positively correlated with the taste sensation ( $r<0.001$ ). The goji berry yogurt contained 32 of kinds of volatile flavor substances, with the content being 1 417.09  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Compounds such as aldehydes in goji berry puree were the main flavor sources of the characteristic flavor of goji berry yogurt. The developed goji berry yoghurt is soft in color, and has a uniform texture, moderate consistency, delicate taste sensation, appropriate acidity and sweetness, with high nutrition and rich flavor.

**Key words:** goji berry yogurt; process optimization; texture quality; flavor substance

随着生活水平的提高和消费习惯的改变, 营养与口感并重的食品日益受到青睐。其中, 以新鲜牛奶为主要原料, 经巴氏杀菌和乳酸菌发酵的酸奶产品<sup>[1]</sup>, 因其口感风味独特及缓解乳糖不耐受症状等功效广受消费者的喜爱。质构品质是酸奶品质的重要指标之一<sup>[2]</sup>, 通常通过测定酸奶的质构参数来优化酸奶的制备工艺。酸奶的质构品质指标包括硬度、稠度、粘聚性等。硬度是酸奶中可溶性微粒聚合与化学键形成的, 其大小是反应酸奶凝胶情况的特征指标<sup>[3]</sup>, 其变化趋势与稠度具有相似趋势, 评价搅拌型酸奶的质构特性时, 主要参考稠度<sup>[4]</sup>。风味是酸奶品质的另一个重要指标, 对酸奶的挥发性风味物质进行研究是主要的研究思路之一<sup>[5,6]</sup>。研究表明, 在酸奶原料中添加植物或其提取物, 既可以改善酸奶的口感风味、提升酸奶的营养价值, 又可以增加酸奶膳食纤维的含量、提高乳酸菌生存率、提高酸奶持水性能和抗氧化性等<sup>[7-9]</sup>。

枸杞 (*Lycium barbarum* L.) 又名枸杞子, 是我国重要的药食同源资源之一, 其含有多糖、黄酮和类胡萝卜素等丰富的营养物质, 具有滋肝补肾、明目补气和预防慢性疾病等功效<sup>[10,11]</sup>。枸杞原产于我国, 主要种植于青海、新疆、宁夏和内蒙古等地区, 枸杞为我国西北地区创造了可观的经济效益<sup>[12]</sup>。

枸杞鲜果不易贮藏和运输, 采摘后加工方式以干制为主, 枸杞干果是最主要的产品形式。其他枸杞加工产品主要有: 枸杞原浆、枸杞饮料和枸杞糖果等, 以及以枸杞综合利用角度开发的药品、化妆品和动物饲料添加物等<sup>[13]</sup>。枸杞与红茶<sup>[14]</sup>、红

枣<sup>[15]</sup>和山药<sup>[16]</sup>等复合后的酸奶配方已有报道, 但添加枸杞后, 酸奶的质构品质和风味品质变化尚不明确, 其酸奶质构参数、感官评价指标和酸度等的相关性未知。本研究在采用单因素试验和正交试验优化枸杞酸奶工艺的基础上, 分析添加枸杞浆后, 枸杞酸奶的质构参数及风味物质组成和含量的变化, 从而确定最优工艺参数, 研发出营养、口感和风味兼顾的枸杞酸奶, 为枸杞酸奶的生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

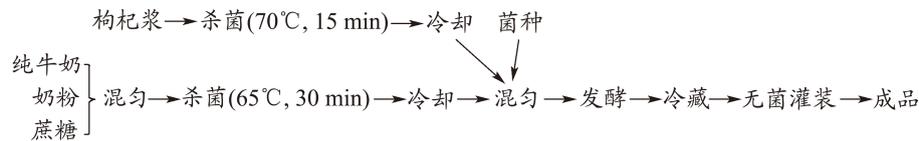
#### 1.1.1 主要材料与试剂

宁夏枸杞, 市售; 纯牛奶, 内蒙古蒙牛实业集团股份有限公司; 全脂奶粉, 河南焙易食品有限公司; 蔗糖, 广州福正东海食品有限公司; 双歧杆菌酸奶发酵粉, 北京川秀科技有限公司。石油醚、氨水、无水乙醚、盐酸、氯化钠, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 环己酮、正构烷, 色谱纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司; MRS 琼脂培养基、MC 琼脂培养基, 北京陆桥生物科技公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

QSJ-A03D2 打浆机, 佛山市小熊厨房电器有限公司; SPME 萃取头, 美国 Supelco 公司; GCMS-QP2010 Ultra 气相色谱质谱联用仪, 日本岛津制作所; DB-1MS 毛细管柱, 美国安捷伦科技公司; TA.XT Plus 物性测定仪, 英国 Stable Micro Systems 公司。

## 1.2 工艺流程



## 1.3 制备枸杞浆

枸杞用纯净水浸泡 20 min (枸杞:纯净水=2:1,  $m/m$ ), 打浆机破碎 2 min, 过 20 目筛, 收集过筛果浆。枸杞浆临用现制<sup>[17]</sup>。

## 1.4 单因素试验设计

以纯牛奶(质量分数)为基准, 以枸杞浆添加量(1.5%、3%、4.5%和6%)、奶粉添加量(2%、3%、4%和5%)、蔗糖添加量(6%、8%、10%和12%)、发酵剂添加量(0.06%、0.08%、0.10%和0.12%)、发酵时间(6、7、8和9 h)及发酵温度(38、40、42和44 °C)等六个因素设计单因素试验<sup>[14]</sup>。

在考察上述单因素时, 其他参数分别为: 枸杞浆添加量 4.5%、奶粉添加量 3%、蔗糖添加量 8%、发酵剂添加量 0.1%, 在 42 °C 条件下发酵 8 h。发酵结束后, 4 °C 后熟 12 h 后无菌灌装。分别测定枸杞酸奶的质构参数和其他理化指标等, 并由 10 位经过感官评价培训的食品专业人员(男:女=1:1)进行感官评定。

## 1.5 正交试验设计

分析单因素试验结果, 综合考虑试验因素对酸奶质构、酸度和感官得分的影响, 选取枸杞添加量、蔗糖添加量、发酵剂添加量和发酵温度进行四因素三水平  $L_9(3^4)$  正交试验<sup>[15]</sup>。表 1 为正交试验因素水平表。

表 1  $L_9(3^4)$  正交试验因素水平表

水平	因素			
	$X_1$ 枸杞浆添加量/%	$X_2$ 蔗糖添加量/%	$X_3$ 发酵剂添加量/%	$X_4$ 发酵温度/°C
1	4	9	0.06	41
2	5	10	0.08	42
3	6	11	0.10	43

## 1.6 枸杞酸奶感官评定

感官评定方法参考 GB 19302-2010<sup>[18]</sup>, 评分如表 2 所示。

表 2 枸杞酸奶感官评价指标

Table 2 Sensory evaluation indices of goji berry yogurt

项目	评价指标
色泽 (15分)	色泽极淡、分布不均匀(0~5分)
	色泽淡橙色、分布较均匀(6~10分)
	色泽橙红色、分布均匀(11~15分)
组织状态 (25分)	凝结状态不佳, 质地不均匀, 有乳清析出(0~7分)
	凝结状态一般, 质地较均匀, 有少量乳清析出(8~19分)
	凝结状态良好, 质地均匀, 光滑细腻, 无明显乳清析出(20~25分)
风味 (30分)	酸奶风味差, 发酵乳香味和枸杞发酵香味不协调(0~8分)
	淡淡的酸奶风味, 发酵乳香味和枸杞发酵香味较协调(9~24分)
	明显的酸奶风味, 发酵乳香味和枸杞发酵香味协调(25~30分)
口感 (30分)	黏度过稀或过稠, 偏酸或偏甜(0~8分)
	黏度适中, 口感较细腻, 微酸或微甜(9~24分)
	黏度适中, 口感细腻, 酸甜适中, 且有淡淡的枸杞味(25~30分)

## 1.7 理化指标测定

### 1.7.1 酸奶质构参数的测定

采用物性测定仪(测量模式为 TPA, A/BE-d45 圆柱型挤压探头, 下压方式), 测定酸奶的硬度(Firmness)、稠度(Consistency)、粘聚性(Cohesiveness, 又称内聚力)和粘度指数(Index of Viscosity)。物性测试仪参数设置为: 测前速度 1 mm/s、测试速度 1 mm/s、测定距离 15 mm、测后速度 10 mm/s、感应力 10 g。枸杞酸奶质构测试过程如图 1 所示, 探头以测前速度接触到样品表面后, 按测试速度压至样品内部(如图 1 所示时间范围为 0~15 s), 随后按照测后速度返回到起始位置(如图 1 所示时间范围为 1~2 这段时间), 因而, 硬度值和稠度值为正值, 粘聚性和粘度指数为负值。

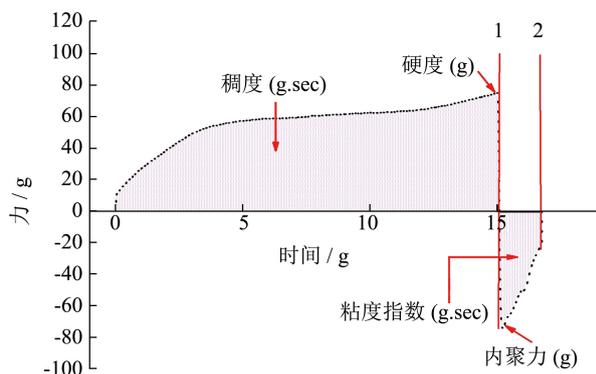


图1 枸杞酸奶质构测试过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of texture test process of goji berry yogurt

### 1.7.2 其他理化指标测定

酸度采用 NaOH 直接滴定法测定<sup>[19]</sup>；pH 值采用精密 pH 计测定；蛋白质采用凯氏定氮法测定<sup>[20]</sup>；脂肪采用碱水解法测定<sup>[21]</sup>；嗜热链球菌和乳酸菌检测采用食品微生物检验乳酸菌检验方法测定<sup>[22]</sup>；大肠菌群采用平板计数法测定<sup>[23]</sup>。

### 1.8 挥发性风味物质测定

参考周元等<sup>[24]</sup>研究方法，略有修改。采用顶空固相微萃取 - 气相色谱质谱联用仪分别测定牛奶（纯牛奶、和奶粉蔗糖混匀灭菌后）、枸杞浆（灭菌后）、原味酸奶和枸杞酸奶的挥发性风味物质组成和含量。取样品 2.50 g 和氯化钠 2.50 g 置于 20 mL 固相微萃取瓶中，添加 10  $\mu$ L 环己酮（10  $\mu$ g/mL）作为内标，45  $^{\circ}$ C 萃取 60 min，230  $^{\circ}$ C 解析 2 min。色谱条件：柱箱温度 40  $^{\circ}$ C 保持 5 min，以 3  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 110  $^{\circ}$ C，再以 4  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 150  $^{\circ}$ C，然后以 10  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 210  $^{\circ}$ C 并保持 5 min，最后以 5  $^{\circ}$ C/min 的速率升至 230  $^{\circ}$ C 并保持 5 min。进样口温度为 250  $^{\circ}$ C，载气（高纯氦气）流速 1.5 mL/min。质谱条件：EI 源电离，离子源温度 220  $^{\circ}$ C，70 eV 电子能量，质量扫描范围  $m/z$ ：35~550<sup>[5]</sup>。定性分析：NIST 检索匹配值，当相似度指数（Similarity Index, SI） $\geq 70$  予以采纳所鉴定的化合物，并根据保留指数（Retention Index, RI）进行定性分析<sup>[25]</sup>。定量分析：内标法定量分析。

### 1.9 数据分析

试验重复 3 次，数值以平均值  $\pm$  标准差表示。采用 Excel 和 Origin 绘图，采用 Minitab 16.2.3 进行多重比较（ $P < 0.05$ ）。采用 R 语言（R 4.2.2）处理数据，包括单因素方差分析（Multcomp 数据包）和

相关系数矩阵分析（Hmisc 数据包）等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验

在优化酸奶配方和工艺的研究中多采用感官评分来直接比较酸奶品质的优劣<sup>[26]</sup>，而测定质构参数，则可从仪器测定的数值预测消费者对酸奶的接受程度<sup>[6]</sup>。

#### 2.1.1 枸杞浆添加量

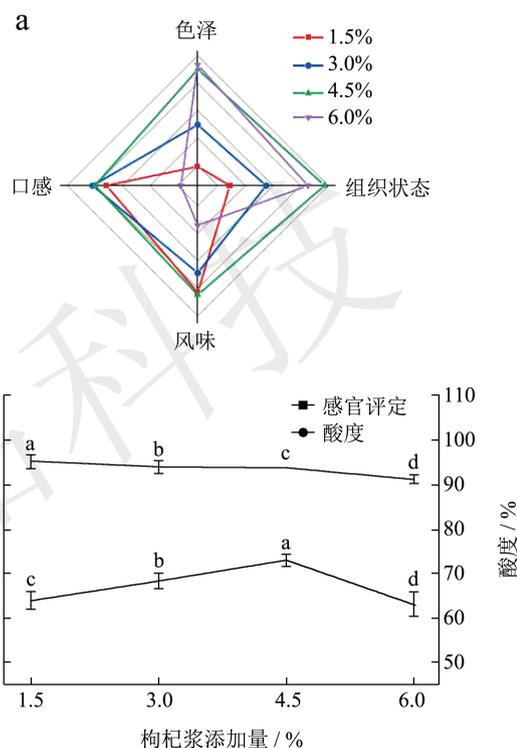


图2 枸杞浆添加量对枸杞酸奶感官评定得分 (a) 和酸度 (b) 的影响

Fig.2 Effect of the amount of goji berry puree on sensory scores (a) and acidity (b) of goji berry yogurt

注：图中不同小写字母表示具有显著差异（ $P < 0.05$ ）。下同。

由图 2 可知，1.5% 组枸杞酸奶的感官评分较低，枸杞风味不足，色泽和组织状态得分均不高，硬度值、稠度值和粘聚性值均较高（表 3）。因此，高硬度、高稠度和高粘聚性值会影响枸杞酸奶的感官得分。4.5% 组枸杞酸奶的口感好，色泽、风味及组织状态均较佳，感官评分最高。6% 组酸奶凝乳效果差，口感和风味较差，感官评分最低。图 2b 表明，枸杞酸奶的酸度值随枸杞浆添加量的增加而降低（ $P < 0.05$ ）。由表 3 可知，枸杞酸奶的硬度值、稠

度值和粘聚性值随着枸杞浆添加量增加而下降，而粘度指数随着枸杞浆添加量的增加而增加。大麦若叶西兰花酸奶的研究结果表明，酸奶硬度随着西兰花汁添加量的增加呈现下降的趋势，当西兰花汁添加量为9%~12%时，酸奶的各个质构参数值都处于中间值，酸奶感官评价得分较高<sup>[4]</sup>。综合分析，枸杞浆添加量在4%~6%为宜。

### 2.1.2 蔗糖添加量

由图3可知，奶粉添加量为3%时，枸杞酸奶的口感、色泽、组织状态、综合风味多项评价指标均衡且得分较高。由图3b可知，酸度值随奶粉量的增加而上升<sup>[3]</sup>，当奶粉量超过3%时，酸度值急剧上升，4%组酸奶的酸度值达到99.14 °T，这与Hélène等<sup>[27]</sup>研究一致。高酸度值会降低乳酸菌的活性，乳蛋白的变性程度也会随之增加，不仅会影响酸奶的口感，还不利于人体消化吸收和肠道健康。此外，质构参数数据表明（表3），枸杞酸奶的硬度、粘聚性和粘度指数均随奶粉添加量的增加而显著增加（ $P < 0.05$ ），但奶粉添加量的变化对酸奶的稠度值没有显著性影响（ $P > 0.05$ ）。因此，奶粉添加量以3%为宜。

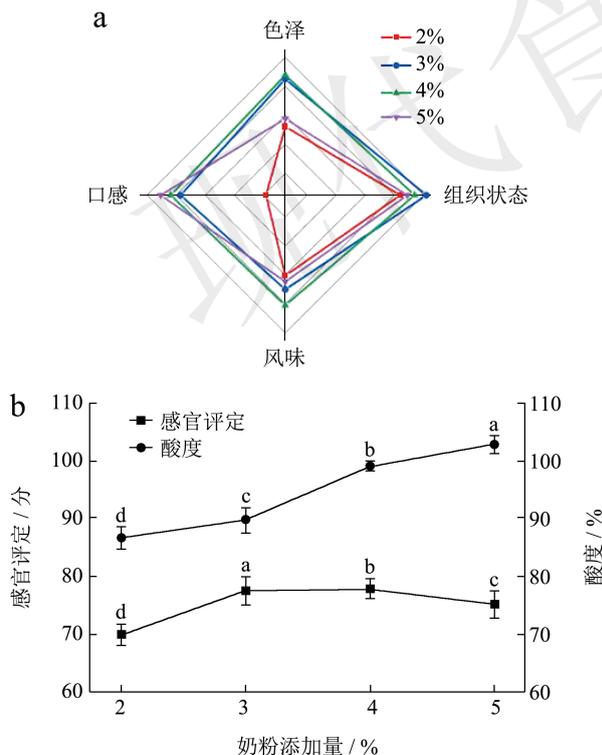


图3 奶粉添加量对枸杞酸奶感官得分 (a) 和酸度 (b) 的影响  
Fig.3 Effect of the amount of milk powder on sensory scores (a) and acidity (b) of goji berry yogurt

### 2.1.3 蔗糖添加量

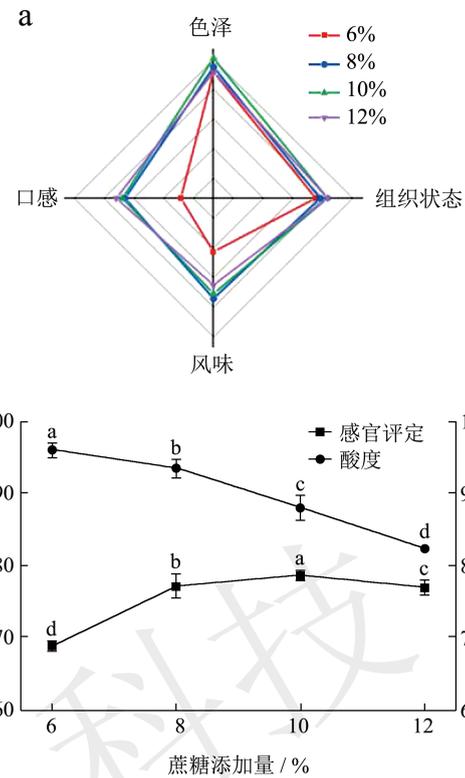


图4 蔗糖添加量对枸杞酸奶感官得分 (a) 和酸度 (b) 的影响  
Fig.4 Effect of the amount of sugar on sensory scores (a) and acidity (b) of goji berry yogurt

从图4可知，蔗糖添加量为6%时，枸杞酸奶的口感和风味评价得分值低。当蔗糖添加量增加到10%时，枸杞酸奶的感官评价得分最高。图4b表明，枸杞酸奶酸度值随蔗糖量的增加而下降。当蔗糖添加量为12%时，低酸度值影响了其感官评价得分。这与蔗糖添加量对山药枸杞酸奶的感官评价得分影响的趋势一致<sup>[16]</sup>。由表3可得，蔗糖添加量对粘聚性没有显著性影响（ $P > 0.05$ ），但酸奶的硬度、稠度和粘度指数均随蔗糖量的增加而降低（ $P < 0.05$ ）。综合分析，将蔗糖添加量以9%~11%为宜。

### 2.1.4 发酵剂添加量

由图5可知，枸杞酸奶的酸度值随着发酵剂添加量的增加呈先升后降的趋势，0.1%组酸奶的酸度值最高。0.08%组酸奶的感官评价指标各项得分均较佳。这与发酵剂添加量对山药枸杞酸奶感官得分的影响趋势一致<sup>[16]</sup>。由表3可知，发酵剂添加量对酸奶的粘聚性和粘度指数均无显著性影响（ $P > 0.05$ ）。因此，枸杞酸奶发酵剂添加量以0.06%~0.10%为宜。

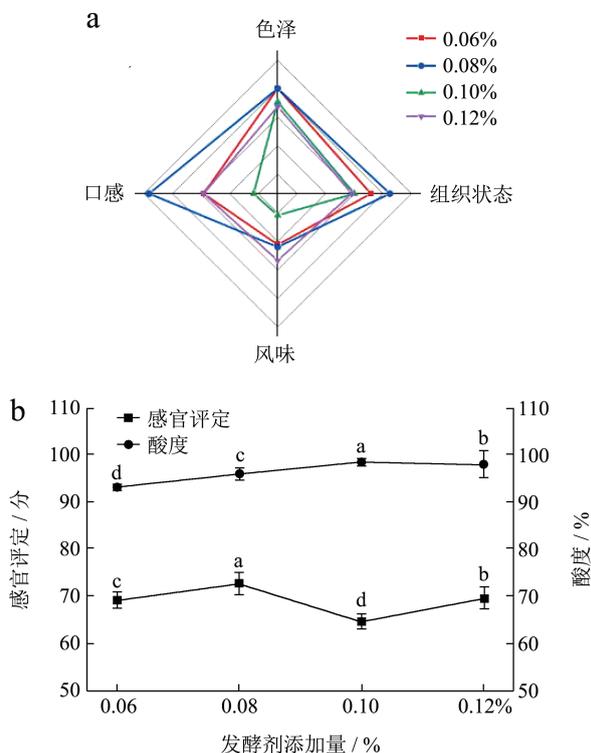


图5 发酵剂添加量对枸杞酸奶感官评定 (a) 和酸度 (b) 的影响

Fig.5 Effect of the amount of starter on sensory scores (a) and acidity (b) of goji berry yogurt

### 2.1.5 发酵时间

由图6可知,不同发酵时间组的枸杞酸奶感官评分从高到低依次为:8 h>9 h>7 h>6 h,酸度值随发酵时间的增加而上升。此外,硬度值、稠度值、粘聚性值和粘度指数值都随发酵时间的延长,呈先增后降的趋势(表3)。发酵时间为8 h时,其口感、色泽、组织状态、风味等指标均较好,且其感官评分最高。大麦若叶西兰花酸奶的感官评分随着发酵时间也呈现先增后降的趋势<sup>[4]</sup>。澳洲坚果酸奶的感官评分在7 h时最高,随后酸度增加,风味变差并伴有少量乳清析出<sup>[26]</sup>。因此,枸杞酸奶发酵时间以8 h为宜。

### 2.1.6 发酵温度

从图7可知,随发酵温度的升高,枸杞酸奶口感得分逐步提高,而枸杞酸奶的凝乳状态良好,质地均匀且光滑细腻,当发酵温度为42℃时,酸度值达到最高97.95°T。但当温度达到44℃时,枸杞酸奶产生凝乳不均匀,出现分层现象,且有少量乳清析出,感官评分从高到低依次为:42℃>44℃>40℃>38℃。研究结果与发酵温度对澳洲坚果酸奶感官评分的影响趋势一致<sup>[26]</sup>。表3表明,枸杞酸奶的硬度值和粘聚性值随发酵温度的上升,变化不

显著( $P>0.05$ ),发酵温度达到44℃时,枸杞酸奶稠度值下降( $P<0.05$ )。综合分析,枸杞酸奶发酵温度以40℃~42℃为宜。

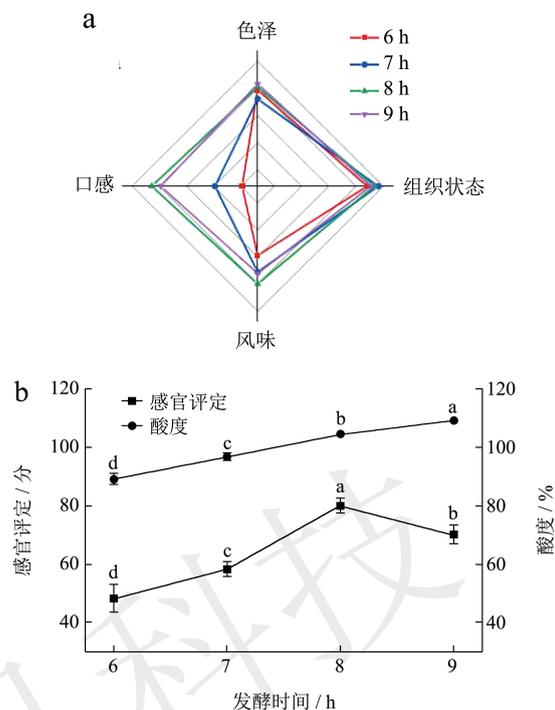


图6 发酵时间对枸杞酸奶感官评定 (a) 和酸度 (b) 的影响

Fig.6 Effect of fermentation time on sensory evaluation indices (a) and acidity (b) of goji berry yogurt

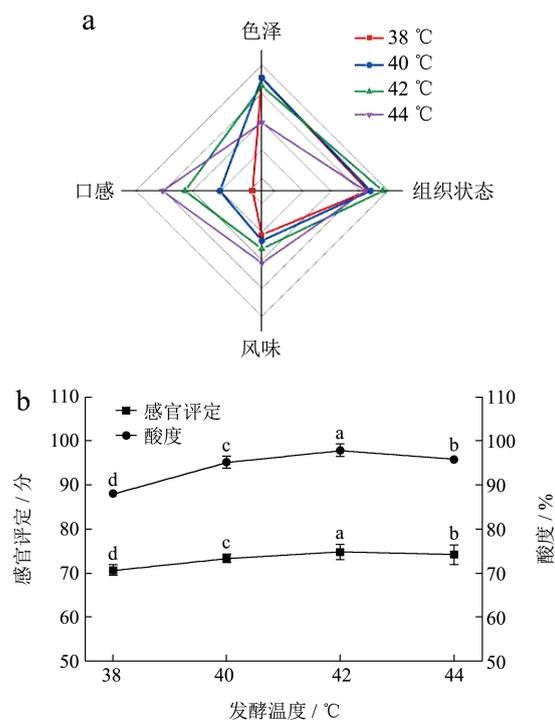


图7 发酵温度对枸杞酸奶感官评定 (a) 和酸度 (b) 的影响

Fig.7 Effect of fermentation temperature on sensory scores (a) and acidity (b) of goji berry yogurt

表 3 枸杞酸奶单因素试验质构参数值  
Table 3 Texture parameters of goji berry yogurt based on single factor experiment

因素	质构测量值				
	硬度/g	稠度/(g·sec)	粘聚性/g	粘度指数/(g·sec)	
枸杞添加量	1.5%	42.89±0.67 <sup>a</sup>	420.66±4.89 <sup>a</sup>	-36.70±2.15 <sup>a</sup>	-9.28±0.39 <sup>b</sup>
	3%	35.88±0.70 <sup>b</sup>	367.28±15.92 <sup>b</sup>	-31.63±1.08 <sup>a</sup>	-11.31±0.99 <sup>ab</sup>
	4.5%	31.82±1.37 <sup>c</sup>	351.09±15.56 <sup>bc</sup>	-18.20±1.68 <sup>b</sup>	-12.37±0.67 <sup>ab</sup>
	6%	28.61±0.79 <sup>c</sup>	305.84±8.51 <sup>c</sup>	-14.59±0.99 <sup>b</sup>	-12.34±1.65 <sup>a</sup>
奶粉添加量	2%	26.00±0.20 <sup>c</sup>	336.23±5.28 <sup>a</sup>	-17.92±0.15 <sup>bc</sup>	-10.42±0.47 <sup>c</sup>
	3%	25.74±0.48 <sup>c</sup>	341.70±14.81 <sup>a</sup>	-17.20±0.40 <sup>c</sup>	-11.80±0.20 <sup>bc</sup>
	4%	27.73±0.40 <sup>b</sup>	358.46±10.96 <sup>a</sup>	-19.08±0.40 <sup>ab</sup>	-13.32±0.34 <sup>b</sup>
	5%	30.58±0.40 <sup>a</sup>	367.22±7.82 <sup>a</sup>	-19.79±0.20 <sup>a</sup>	-17.91±1.06 <sup>a</sup>
蔗糖添加量	6%	25.08±0.22 <sup>a</sup>	328.08±0.84 <sup>a</sup>	-16.73±0.13 <sup>a</sup>	-9.72±0.40 <sup>a</sup>
	8%	25.67±0.39 <sup>a</sup>	332.78±2.31 <sup>a</sup>	-17.08±0.14 <sup>a</sup>	-10.15±0.18 <sup>a</sup>
	10%	23.24±0.33 <sup>b</sup>	305.56±4.46 <sup>b</sup>	-15.98±0.48 <sup>a</sup>	-6.37±0.55 <sup>b</sup>
	12%	23.24±0.70 <sup>b</sup>	311.89±0.84 <sup>b</sup>	-15.66±0.77 <sup>a</sup>	-7.29±0.56 <sup>b</sup>
发酵剂添加量	0.06%	27.76±0.30 <sup>b</sup>	354.95±5.25 <sup>b</sup>	-19.02±0.33 <sup>a</sup>	-14.07±0.55 <sup>a</sup>
	0.08%	29.46±0.13 <sup>a</sup>	373.23±0.26 <sup>a</sup>	-18.89±0.69 <sup>a</sup>	-16.26±1.21 <sup>a</sup>
	0.1%	28.63±0.19 <sup>ab</sup>	357.61±1.59 <sup>b</sup>	-18.74±0.56 <sup>a</sup>	-13.80±0.16 <sup>a</sup>
	0.12%	29.00±0.54 <sup>ab</sup>	365.80±1.74 <sup>ab</sup>	-19.84±0.64 <sup>a</sup>	-14.87±0.45 <sup>a</sup>
发酵温度	38 °C	28.68±1.15 <sup>a</sup>	388.43±2.46 <sup>a</sup>	-17.62±1.20 <sup>a</sup>	-14.52±1.30 <sup>b</sup>
	40 °C	29.53±1.08 <sup>a</sup>	385.58±4.68 <sup>a</sup>	-18.50±0.84 <sup>a</sup>	-17.37±1.00 <sup>ab</sup>
	42 °C	32.38±0.56 <sup>a</sup>	378.12±1.34 <sup>a</sup>	-20.07±0.30 <sup>a</sup>	-18.59±0.58 <sup>ab</sup>
	44 °C	33.02±2.49 <sup>a</sup>	359.27±7.82 <sup>b</sup>	-20.67±0.41 <sup>a</sup>	-19.72±1.16 <sup>a</sup>
发酵时间	6 h	15.96±0.15 <sup>d</sup>	197.72±0.42 <sup>c</sup>	-9.59±0.02 <sup>b</sup>	-1.29±0.04 <sup>d</sup>
	7 h	25.75±0.65 <sup>c</sup>	253.62±15.94 <sup>b</sup>	-18.11±1.09 <sup>a</sup>	-12.46±1.06 <sup>c</sup>
	8 h	31.44±0.12 <sup>a</sup>	382.00±0.15 <sup>a</sup>	-20.26±0.28 <sup>a</sup>	-19.74±0.16 <sup>a</sup>
	9 h	29.69±0.34 <sup>b</sup>	369.38±0.46 <sup>a</sup>	-18.35±1.05 <sup>a</sup>	-15.34±0.35 <sup>b</sup>

注：同一单因素同一质构参数不同小写字母表示具有显著差异 ( $r < 0.05$ )。

表 4 单因素试验方差分析  
Table 4 Analysis of variance of single factor experiment

因素	感官评分		
	F 值	P 值	显著性
枸杞浆添加量	15.19	$1.19 \times 10^{-2}$	*
奶粉添加量	1.941	$2.65 \times 10^{-1}$	
蔗糖添加量	24.45	$4.93 \times 10^{-3}$	**
发酵剂添加量	8.291	$3.43 \times 10^{-2}$	*
发酵温度	20.585	$9.98 \times 10^{-3}$	*
发酵时间	2.166	$2.93 \times 10^{-1}$	

注：“\*\*\*”表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )，“\*”表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

单因素试验方差分析表明，枸杞浆添加量、发酵剂添加量和发酵温度对枸杞酸奶的感官评分影响显著 ( $P < 0.05$ )，蔗糖添加量对枸杞酸奶的感官评分影响极显著 ( $P < 0.01$ )，选取上述因素进行正交试验优化。

## 2.2 正交试验结果与分析

由表 5 可得，各因素对感官评分的影响顺序是  $X_2 > X_1 > X_3 > X_4$ ，即蔗糖添加量影响最大，随后依次为枸杞添加量、发酵剂添加量和发酵时间。通过验证试验，最优水平组合制备的枸杞酸奶的感官评分为 85.2 分。此时，其硬度为硬度 28.32 g，稠度 379.31 g·sec，粘聚性 -18.35 g，粘度指数 -16.98 g·sec。由此得到枸

杞酸奶的最优发酵工艺参数为：枸杞添加量 5%，蔗糖添加量 10%，发酵剂添加量 0.1%，奶粉添加量 3%，发酵温度 42 °C，发酵时间 8 h。枸杞酸奶呈现柔和的橙红色，稠度适中，质地均匀，口感细腻，酸甜适宜，有丰富的发酵乳香和枸杞香味。

表 5  $L_9(3^4)$  正交设计试验结果与分析

Table 5 Results and analysis of  $L_9(3^4)$  orthogonal experiment design

试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	感官评分/分
1	1	1	1	1	70.7
2	1	2	2	2	75.7
3	1	3	3	3	69.0
4	2	1	2	3	76.2
5	2	2	3	1	80.0
6	2	3	1	2	72.7
7	3	1	3	2	76.2
8	3	2	1	3	75.0
9	3	3	2	1	71.7
$k_1$	71.80	74.37	72.80	74.13	
$k_2$	76.30	76.90	74.53	74.87	
$k_3$	74.30	71.13	75.07	73.40	
$R$	4.50	5.77	2.27	1.47	
排秩	2	1	3	4	
最佳水平	2	2	3	2	85.2

由表 6 可知，制备的枸杞酸奶的蛋白质含量达 7.11%，高于大部分酸奶蛋白质含量，且脂肪含量低于澳洲坚果酸奶<sup>[26]</sup>。枸杞酸奶的酸度为 100.20 °T，与大麦若叶西兰花酸奶和市售酸奶的酸度（105~115 °T）接近<sup>[4]</sup>。其他理化指标和微生物指标均符合 GB 19302-2010<sup>[18]</sup>标准要求。

表 6 枸杞酸奶理化及微生物指标

Table 6 Physicochemical and microbiological indexes of goji berry yogurt

项目	测量数值	标准要求
脂肪/(g/100 g)	5.82±0.04	≥2.5
蛋白质/(g/100 g)	7.11±0.36	≥2.3
酸度/°T	100.20±1.03	≥70
pH 值	4.23±0.037	-
嗜热链球菌/(CFU/mL)	$1.5 \times 10^8$	$1 \times 10^6$
乳杆菌/(CFU/mL)	$2.7 \times 10^5$	
大肠菌群/(CFU/mL)	未检出	未检出

### 2.3 枸杞酸奶质构参数、感官评价指标和酸度的相关性分析

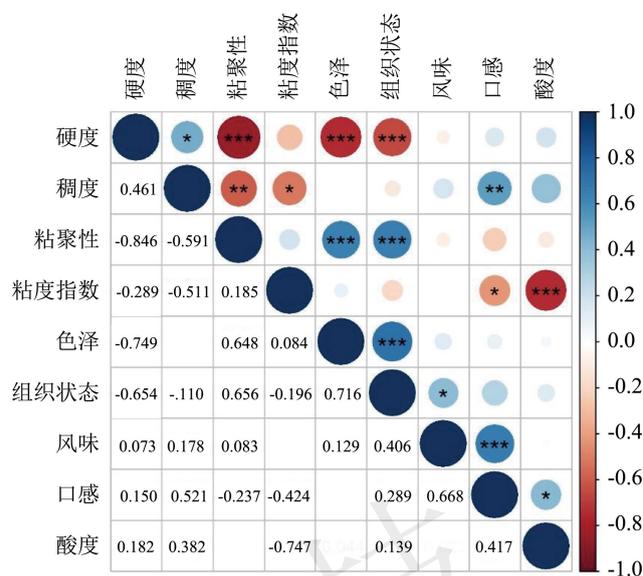


图 8 枸杞酸奶的质构参数、感官指标和酸度的相关性分析系数矩阵

Fig.8 Coefficient matrix of correlation analysis between texture parameters, sensory scores and acidity of goji berry yogurt

注：“\*\*\*”表示相关性极显著 ( $P < 0.001$ )，“\*\*”表示相关性极显著 ( $P < 0.01$ )，“\*”表示相关性显著 ( $P < 0.05$ )。

图 8 为枸杞酸奶的质构参数、感官评价指标和酸度的相关系数矩阵。从质构参数之间的相关性分析可知，枸杞酸奶的硬度与稠度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，其与粘聚性呈极显著负相关 ( $P < 0.001$ )。稠度与粘聚性呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，其与粘度指数呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。从质构参数与感官评价指标的相关性分析可知，枸杞酸奶的硬度与感官指标中的色泽和组织状态呈极显著负相关 ( $P < 0.001$ )。稠度与感官评价指标中的口感呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。粘聚性与感官评价指标中的色泽和组织状态呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ )。粘度指数与感官指标中的口感呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。经枸杞浆添加量及其他发酵条件的优化后，枸杞酸奶硬度值和稠度值下降，粘聚性较小，粘度指数较大，色泽和组织状态得分得到提高。

从质构参数与酸度的相关性分析可知，粘度指数与酸度呈极显著负相关 ( $P < 0.001$ )，随着酸奶发酵产酸，粘度指数值下降，粘度指数增大。从感官评价指标与酸度的相关性分析可知，酸度与口

感呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。因此, 较高的酸度枸杞酸奶将获得较高的口感得分。

对于感官指标之间而言, 枸杞酸奶的色泽得分和组织状态得分呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ ), 组织状态得分和风味得分呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 以及风味得分与口感得分呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ )。因此, 枸杞酸奶的 4 个感官指标间呈现出连锁效应。由此推测, 添加一定量的枸杞浆后, 枸杞酸奶色泽得分得到提高, 对组织状态、风味和口感得分也产生了积极的影响。这与大麦若叶西兰花酸奶的感官得分趋势一致<sup>[4]</sup>, 大麦若叶汁添加量从 5% 提高到 15%, 西兰花汁添加量从 6% 提高到 9% 时, 感官评分得分提高。

#### 2.4 枸杞酸奶挥发性风味物质分析

由表 7 可得, 四组样品中共检测出 53 种挥发性风味物质, 包括醇类 (13)、酸类 (10)、酮类 (10)、醛类 (7)、酯类 (4)、烷烃类 (4)、烯类 (3)、其它 (2) 等, 其相对含量从高到底依次为: 酸类 (40.27%) > 酮类 (27.93%) > 醇类 (12.46%) > 烷烃类 (9.12%) > 醛类 (6.65%) > 酯类 (1.94%) > 烯类 (0.87%) > 其它 (0.75%)。四组样品风味物质种类排序为: 枸杞酸奶 (32) > 原味酸奶 (29) > 枸杞浆 (28) > 牛奶 (15), 其总含量从高到底依次为: 枸杞酸奶 > 枸杞浆 > 原味酸奶 > 灭菌牛奶。因此, 枸杞酸奶挥发性风味物质种类最多, 总量也最高。

由图 9 可知, 酸类、酮类、醇类、醛类和酯类物质等是四组样品中主要挥发性风味物质。由表 7 可知, 牛奶中检测出 2-庚酮 (96.99  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) 和 2-壬酮 (33.16  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 这是牛奶经加热杀菌过程产生的风味物质。王伟君等<sup>[28]</sup>研究表明牛奶加热后产生甲基酮、2-庚酮和 2-壬酮等, 这些成分对加热牛乳中的风味贡献非常大。枸杞浆中共检测出 28 种风味物质, 在枸杞浆中检测出 2-戊基咪喃 (表 7), 其具有豆香、果香、青香和类似蔬菜的气味<sup>[29]</sup>。

枸杞浆中检测出 11 种醇类物质, 是枸杞浆中种类最多和含量最高的一类风味物质 (表 7), 这与曲云卿等<sup>[30]</sup>研究结果一致。由表 7 可知, 四组样品中均检测出乙醇, 其中枸杞浆中乙醇含量最高 62.87  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 牛奶中的乙醇含量最低 (4.69  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )。乙醇含量过高不利于酸奶的品质, 枸杞酸奶中的乙醇含量 (15.46  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) 低于原味酸奶 (30.54  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 有

利于风味平衡。这与 Joung 等<sup>[7]</sup>研究一致, 其研究结果显示, 添加草本提取物 (莲和柿子) 的发酵乳中乙醇含量低于比原味酸奶。

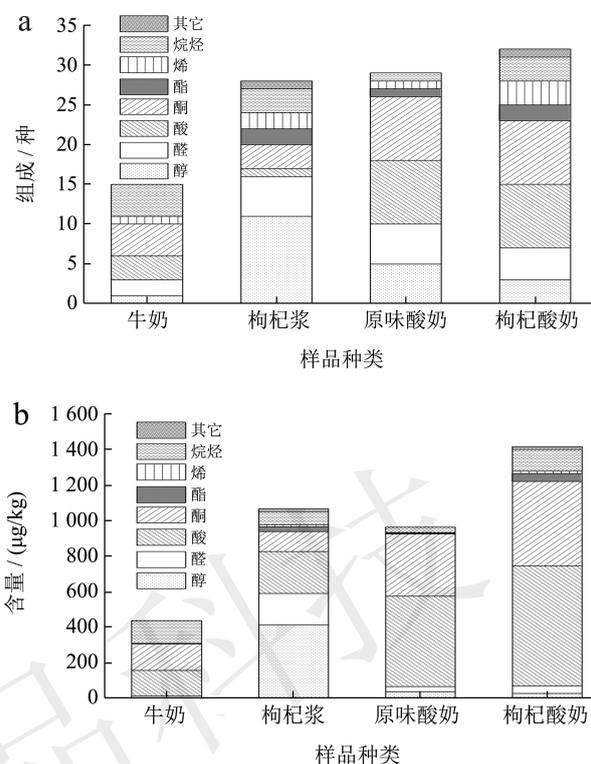


图 9 枸杞酸奶风味物质的组成 (a) 与含量 (b)

Fig.9 The composition (a) and content (b) of volatiles in goji berry yogurt

醛类物质对酸奶的总体风味的构成贡献较大, 其中乙醛具有青苹果味和刺激性味, 主要由中间代谢产物丙酮酸脱羧而来<sup>[6]</sup>。枸杞酸奶中的乙醛 (5.57  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) 比原味酸奶 (4.64  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) 含量高。此外, 枸杞浆和枸杞酸奶中均含有一定量的己醛、苯甲醛和壬醛, 上述风味物质呈青草和青香味等, 表明枸杞浆的加入赋予了枸杞酸奶以枸杞风味。

酸奶中含有大量的酮类化合物, 它们的形成与酸奶中多不饱和脂肪酸的  $\beta$ -氧化代谢途径、热降解, 氨基酸降解或微生物代谢有关<sup>[7]</sup>。从表 7 可得, 枸杞酸奶检测出 2,3-丁二酮、2,3-戊二酮、2-丁酮、2-庚酮、2-戊酮、乙偶姻、苯乙酮和香芹酮, 其中的乙偶姻 (288.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) 和 2,3-丁二酮 (90.62  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) 含量较高, 这两种物质是酸奶奶香味形成的最主要成分, 2,3-戊二酮在枸杞酸奶中的含量也较高 (36.36  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )。从图 9b 可以看出, 枸杞酸奶中酮类化合物的总含量比原味酸奶高, 且在枸杞酸奶中检测出的苯乙酮具有令人愉快的芳香气味和果香味 (表 7), 这些可能是使枸杞酸奶的风味更加浓郁的原因。

表 7 牛奶、枸杞浆、原味酸奶和枸杞酸奶中挥发性风味物质的组成与含量

Table 7 Composition and content of volatiles in milk, goji berry puree, plain yoghurt and goji berry yogurt

编号	保留时间/min	SI	RI	香气物质	含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ FW)			
					牛奶	枸杞浆	原味酸奶	枸杞酸奶
1	4.851	98	713	乙醇	4.70±0.62 <sup>d</sup>	62.87±1.27 <sup>a</sup>	30.54±0.33 <sup>b</sup>	15.46±0.13 <sup>c</sup>
2	10.473	93	787	3- 甲基 -3- 丁 -1- 醇	-	7.20±0.53 <sup>a</sup>	0.97±0.03 <sup>b</sup>	-
3	10.708	93	790	正戊醇	-	40.33±3.26 <sup>a</sup>	-	-
4	10.894	96	793	2- 甲基 -1- 丁醇	-	6.03±0.26 <sup>a</sup>	-	-
5	12.286	84	811	1- 戊醇	-	-	1.73±0.36 <sup>a</sup>	-
6	12.476	97	813	2,3- 丁二醇	-	116.17±10.72 <sup>a</sup>	-	-
7	12.617	94	815	3- 甲基 -2- 丁烯 -1- 醇	-	31.71±6.61 <sup>a</sup>	-	-
8	17.002	93	872	顺 -3- 己烯醇	-	19.64±2.58 <sup>a</sup>	-	-
9	17.663	97	881	反 -2- 己烯醇	-	10.74±0.72 <sup>a</sup>	-	-
10	17.873	98	884	1- 己醇	-	61.58±2.33 <sup>a</sup>	2.47±0.01 <sup>c</sup>	10.32±0.01 <sup>b</sup>
11	23.924	97	970	1- 庚醇	-	-	2.82±0.01 <sup>b</sup>	2.96±0.65 <sup>a</sup>
12	31.382	96	1 090	苯乙醇	-	29.25±1.07 <sup>a</sup>	-	-
13	37.302	91	1 208	3,7,11- 三甲基 -1- 十二烷醇	-	27.00±1.59 <sup>a</sup>	-	-
醇类总计/种					1	11	5	3
醇类总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					4.70±0.62 <sup>d</sup>	412.52±16.80 <sup>a</sup>	38.53±0.52 <sup>b</sup>	28.74±0.71 <sup>c</sup>
1	4.537	96	709	乙醛	-	-	4.64±0.03 <sup>b</sup>	5.57±0.16 <sup>a</sup>
2	7.570	97	749	3- 甲基 - 丁醛	-	27.01±1.93 <sup>a</sup>	-	-
3	13.487	89	827	己醛	-	96.64±15.41 <sup>a</sup>	12.71±0.01 <sup>c</sup>	16.71±0.01 <sup>b</sup>
4	19.363	91	903	庚醛	3.88±0.34 <sup>a</sup>	-	1.71±0.01 <sup>b</sup>	-
5	22.341	97	947	苯甲醛	-	11.00±0.67 <sup>a</sup>	1.96±0.17 <sup>c</sup>	3.06±0.47 <sup>b</sup>
6	25.487	93	992	正辛醛	-	14.56±0.81 <sup>a</sup>	-	-
7	31.313	97	1 089	壬醛	6.70±0.46 <sup>d</sup>	28.56±1.60 <sup>a</sup>	7.38±0.24 <sup>c</sup>	16.50±1.34 <sup>b</sup>
醛类总计/种					2	5	5	4
醛类总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					10.58±0.66 <sup>d</sup>	177.77±17.36 <sup>a</sup>	28.40±0.32 <sup>c</sup>	41.84±1.66 <sup>b</sup>
1	6.591	99	736	乙酸	-	237.84±10.75 <sup>a</sup>	16.84±0.21 <sup>c</sup>	33.82±0.70 <sup>b</sup>
2	14.377	97	837	丁酸	-	-	115.68±5.82 <sup>b</sup>	151.44±5.26 <sup>a</sup>
3	14.851	93	844	2,2- 二甲基丙酸	-	-	1.10±0.07 <sup>a</sup>	-
4	15.883	84	857	二乙基 - 乙酸	-	-	1.19±0.06 <sup>b</sup>	3.18±0.03 <sup>a</sup>
5	17.119	96	874	2- 甲基 - 丁酸	-	-	1.28±0.01 <sup>b</sup>	2.23±0.15 <sup>a</sup>
6	25.412	98	993	己酸	78.20±0.27 <sup>c</sup>	-	277.84±3.90 <sup>a</sup>	255.96±12.07 <sup>b</sup>
7	34.353	97	1 148	苯甲酸	-	-	12.62±1.01 <sup>b</sup>	22.48±1.64 <sup>a</sup>
8	35.092	96	1 163	辛酸	47.67±0.32 <sup>c</sup>	-	82.56±0.75 <sup>b</sup>	84.24±5.26 <sup>a</sup>
9	39.269	91	1 257	壬酸	-	-	-	121.57±14.61 <sup>a</sup>
10	42.458	86	1 350	正癸酸	17.57±1.76 <sup>a</sup>	-	-	-
酸类总计/种					3	1	8	8
酸类总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					143.44±2.01 <sup>d</sup>	237.84±10.75 <sup>c</sup>	509.11±7.82 <sup>b</sup>	674.92±23.12 <sup>a</sup>

续表 7

编号	保留时间/min	SI	RI	香气物质	含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ FW)			
					牛奶	枸杞浆	原味酸奶	枸杞酸奶
1	6.079	93	765	2,3- 丁二酮	-	-	41.01 $\pm$ 1.89 <sup>b</sup>	90.62 $\pm$ 0.27 <sup>a</sup>
2	6.274	97	732	2- 丁酮	4.61 $\pm$ 0.28 <sup>b</sup>	-	7.76 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>	3.78 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>
3	8.573	98	762	2- 戊酮	13.17 $\pm$ 0.71 <sup>a</sup>	-	5.40 $\pm$ 0.33 <sup>c</sup>	5.73 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>
4	8.759	93	765	2,3- 戊二酮	-	-	6.55 $\pm$ 0.68 <sup>b</sup>	36.36 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>
5	9.108	98	769	乙偶姻	-	97.91 $\pm$ 5.91 <sup>c</sup>	216.99 $\pm$ 11.23 <sup>b</sup>	288.00 $\pm$ 1.98 <sup>a</sup>
6	13.231	90	823	3- 羟基 -3- 甲基 -2- 丁酮	-	4.46 $\pm$ 0.61 <sup>b</sup>	16.93 $\pm$ 1.41 <sup>a</sup>	-
7	18.742	96	895	2- 庚酮	96.99 $\pm$ 6.42 <sup>a</sup>	9.13 $\pm$ 0.38 <sup>d</sup>	39.99 $\pm$ 8.57 <sup>c</sup>	44.30 $\pm$ 9.02 <sup>b</sup>
8	28.637	86	1 044	苯乙酮	-	-	-	3.37 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>
9	30.689	97	1 078	2- 壬酮	33.16 $\pm$ 1.13 <sup>a</sup>	-	15.76 $\pm$ 0.57 <sup>b</sup>	-
10	38.514	82	1 280	香芹酮	-	-	-	3.64 $\pm$ 1.36 <sup>a</sup>
酮类总计/种					4	3	8	8
酮类总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )						147.93 $\pm$ 8.34 <sup>c</sup>	111.50 $\pm$ 6.67 <sup>d</sup>	350.39 $\pm$ 20.39 <sup>b</sup>
1	5.420	96	721	乙酸甲酯	-	8.44 $\pm$ 2.63 <sup>a</sup>	-	-
2	6.727	96	738	乙酸乙酯	-	-	3.67 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	6.23 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>
3	25.859	96	998	顺 -3- 己烯基乙酸酯	-	18.95 $\pm$ 0.80 <sup>a</sup>	-	-
4	48.748	75	1 902	癸酸癸酯	-	-	-	38.12 $\pm$ 16.08 <sup>a</sup>
酯类总计/种					0	2	1	2
酯类总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					0	27.39 $\pm$ 2.95	3.67 $\pm$ 0.12	44.35 $\pm$ 16.13
1	27.924	91	1 032	D- 柠檬烯	-	6.12 $\pm$ 0.76 <sup>a</sup>	-	3.46 $\pm$ 0 <sup>b</sup>
2	29.522	95	1 059	$\gamma$ - 松油烯	4.31 $\pm$ 0.46 <sup>c</sup>	5.61 $\pm$ 0.44 <sup>b</sup>	3.14 $\pm$ 0.13 <sup>d</sup>	7.21 $\pm$ 0.87 <sup>a</sup>
3	33.466	92	1 130	对薄荷脑 1,5,8- 三烯	-	-	-	4.04 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>
萜烯类总计/种					1	2	1	3
萜烯类总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					4.31 $\pm$ 0.46 <sup>c</sup>	11.73 $\pm$ 1.13 <sup>b</sup>	3.14 $\pm$ 0.13 <sup>d</sup>	14.71 $\pm$ 1.13 <sup>a</sup>
1	27.344	95	1 023	邻伞花烃	33.31 $\pm$ 5.89 <sup>c</sup>	50.62 $\pm$ 1.95 <sup>b</sup>	31.37 $\pm$ 4.79 <sup>d</sup>	54.16 $\pm$ 1.55 <sup>a</sup>
2	32.241	97	1 105	十一烷	65.47 $\pm$ 2.34 <sup>a</sup>	15.26 $\pm$ 0.45 <sup>c</sup>	-	40.29 $\pm$ 0.50 <sup>b</sup>
3	43.95	98	1 413	十四烷	8.68 $\pm$ 0.19 <sup>b</sup>	7.36 $\pm$ 0.21 <sup>c</sup>	-	27.55 $\pm$ 3.64 <sup>a</sup>
4	46.355	96	1 500	十七烷	20.33 $\pm$ 0.75 <sup>a</sup>	-	-	-
烷烃总计/种					4	3	1	3
烷烃总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					127.79 $\pm$ 7.16 <sup>a</sup>	73.24 $\pm$ 2.34 <sup>b</sup>	31.37 $\pm$ 4.79 <sup>c</sup>	122 $\pm$ 4.74 <sup>a</sup>
1	25.380	94	991	2- 戊基呋喃	-	14.39 $\pm$ 1.17 <sup>a</sup>	-	-
2	39.742	92	1 269	茴香脑	-	-	-	14.73 $\pm$ 0.57 <sup>a</sup>
其它总计/种					0	1	0	1
其它总含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					0	14.39 $\pm$ 1.17 <sup>a</sup>	0	14.73 $\pm$ 0.57 <sup>a</sup>
汇总/种					15	25	29	32
含量汇总/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					438.75 $\pm$ 14.03 <sup>d</sup>	1 066.38 $\pm$ 49.84 <sup>b</sup>	964.61 $\pm$ 25.05 <sup>c</sup>	1 417.09 $\pm$ 53.20 <sup>a</sup>

注：同行上标不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

酸类物质包括挥发性物质（以 C<sub>2</sub>-C<sub>10</sub> 饱和脂肪酸为主的挥发性脂肪酸，是酸奶酸味感的主要呈味物质）和非挥发性物质（乳酸、柠檬酸和琥珀酸等），其中乳酸是发酵乳滋味中的主要呈酸性物质<sup>[28]</sup>。由表 7 可知，原味酸奶和枸杞酸奶各检测出 8 种酸物质，相对原味酸奶，枸杞酸奶中的总酸含量较高。枸杞酸奶中检测出大量的壬酸（121.57 μg/kg），该物质在发酵乳制品中呈脂肪和椰子香味<sup>[31]</sup>。枸杞浆中检测出乙酸，且高于原味酸奶和枸杞酸奶，推测枸杞酸奶中的乙酸部分来源于枸杞浆。Joung 等<sup>[7]</sup>在草本酸奶、羊奶和其它酸奶中也检测出乙酸。

酸奶中的酯类化合物主要是由脂肪酸水解和微生物代谢产生<sup>[32]</sup>。乙酸乙酯具有菠萝香味和果味，枸杞酸奶的乙酸乙酯高于原味酸奶。此外在枸杞酸奶中还检测出癸酸癸酯，癸酸癸酯具有果香味。酸奶中的酯类化合物的风味阈值较低，低浓度的酯类化合物对酸奶风味的贡献较大<sup>[32]</sup>，上述酯类物质都为枸杞酸奶的风味形成作出了积极的贡献。

由表 7 可知，枸杞浆和枸杞酸奶中检测出 3 种萜烯类化合物（D- 柠檬烯、γ- 松油烯和对薄荷脑 1,5,8- 三烯），而原味酸奶中只检测出 γ- 松油烯，且低于枸杞酸奶中 γ- 松油烯的含量。枸杞酸奶的 D- 柠檬烯来源于枸杞浆，D- 柠檬烯呈柑橘香味，赋予枸杞酸奶一定的果香。

因此，和原味酸奶相比，枸杞酸奶挥发性醇类物质含量减少，挥发性醛类、酸类、酮类、酯类和萜烯类物质增多，风味更加浓郁，枸杞浆中的醛类等有利于枸杞酸奶的枸杞风味形成。

### 3 结论

枸杞酸奶的最优工艺为：以纯牛奶为基准（质量分数），枸杞浆添加量 5%，奶粉添加量 3%，蔗糖添加量 10%，发酵剂添加量 0.1%，在 42 °C 条件下发酵 8 h，感官评分为 85.2 分，酸度值为 100.20 °T。此条件下，其质构参数值分别为：硬度 28.32 g，稠度 379.31 g·sec，粘聚性 -18.35 g，粘度指数 -16.98 g·sec。枸杞酸奶质构参数、感官评价指标和酸度之间存在密切关联，优化后的枸杞浆添加量使得枸杞酸奶色泽得分得到提高，对组织状态、风味和口感得分也产生了积极的影响。枸杞酸奶风味浓郁，将发酵乳制品风味和枸杞风味实现了良好融合。研发的枸杞酸奶呈现柔和的橙红色，质地均匀，稠度适中，口感细腻，酸甜适宜，各项理化指标均符合国标要求。

### 参考文献

- [1] SHARIFAN P, ZIAEE A, DARROUDI S, et al. Effect of low-fat dairy products fortified with 1500IU nano encapsulated vitamin D3 on cardiometabolic indicators in adults with abdominal obesity: a total blinded randomized controlled trial [J]. *Current Medical Research and Opinion*, 2021, 37(4): 579-588.
- [2] 杨贝贝,康会茹.不同发酵剂对黑枣酸奶品质的影响[J]. *中国酿造*,2021,40(4):138-142.
- [3] 候文静,高玥雯,尉洁,等.大麦若叶青汁酸奶的研制及品质分析[J]. *中国乳品工业*,2022,50(8):58-64.
- [4] 郑清,王刚,卞雪芬,等.大麦若叶西兰花酸奶的制备工艺优化[J]. *现代食品科技*,2022,38(7):240-246,97.
- [5] 成堃,袁雪娇,高星,等.蓝莓风味酸奶挥发性风味物质的分析[J]. *齐鲁工业大学学报*,2019,33(4):39-44.
- [6] 韩喜艳,宋菲,张玉锋,等.热处理对椰子植物酸奶理化性质及挥发性成分的影响[J]. *现代食品科技*,2022,38(3): 266-275,265
- [7] JOUNG J Y, LEE J Y, HA Y S, et al. Enhanced microbial, functional and sensory properties of herbal yogurt fermented with Korean traditional plant extracts [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2016, 36(1): 90-99.
- [8] YANG S S, YAN D L, ZOU Y T, et al. Fermentation temperature affects yogurt quality: A metabolomics study [J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101104.
- [9] JOUKI M, KHAZAEI N, REZAEI F, et al. Production of symbiotic freeze dried yoghurt powder using microencapsulation and cryopreservation of *L. plantarum* in alginate-skim milk microcapsules [J]. *International Dairy Journal*, 2021, 122: 105133.
- [10] YONG G, XIN Y T, LI Q L, et al. Consumption of fruit and vegetable and risk of coronary heart disease: A meta-analysis of prospective cohort studies [J]. *International Journal of Cardiology*, 2015, 183: 129-137.
- [11] JOHNSON E J. Role of lutein and zeaxanthin in visual and cognitive function throughout the lifespan [J]. *Nutrition Reviews*, 2014, 72(9): 605-612.
- [12] 姚霞.中国枸杞属植物不同种质资源的研究及紫花地丁的化学成分研究[D].北京:中国协和医科大学,2010
- [13] 罗青,米佳,冉林武,等.枸杞类胡萝卜素研究进展[J]. *食品工业科技*,2018,39:331-335,339.
- [14] 杨电增,邹兰兰,李云,等.红茶枸杞酸奶发酵工艺条件的优化及其品质测定[J]. *黑龙江畜牧兽医 (下半月)*, 2019,9:42-46, 179-180.
- [15] 邓凯,陈文璐,何相伟,等.俄罗斯风味红枣枸杞酸奶的研制[J]. *中国乳业*,2022,9:88-94.
- [16] 杨电增,张冠群,李宗泽,等.响应面法优化山药枸杞酸奶

- 发酵工艺[J].北方园艺,2018,6:111-118.
- [17] LUO Y M, LIU Y, GUO H, et al. Evaluation of the bioaccessibility of carotenoid esters from *Lycium barbarum* L. in nano-emulsions: A kinetic approach [J]. Food Research International, 2020, 136: 109611.
- [18] GB19302-2010,食品安全国家标准发酵乳[S].
- [19] GB5009.239-2016,食品安全国家标准食品酸度的测定[S].
- [20] GB5009.5-2016,食品安全国家标准食品中蛋白质的测定[S].
- [21] GB5009.6-2016,食品安全国家标准食品中脂肪的测定[S].
- [22] GB4789.35-2016,食品安全国家标准食品微生物学检验乳酸菌检验[S].
- [23] GB4789.3-2016,食品微生物学检验大肠菌群计数[S].
- [24] 周元,傅虹飞,胡亚云.基于电子鼻和GC-MS的酶解猕猴桃汁香气成分动态解析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(3):101-109.
- [25] 文凌云,徐祥林,赵冬,等. GC-MS法分析柠檬蒸馏酒与发酵酒挥发性风味物质[J].中国酿造, 2020, 39(8): 202-205.
- [26] 汤木果,汪玉兰,赵存朝,等.澳洲坚果酸奶的研制[J].现代食品科技,2022,38(6):214-222.
- [27] HÉLÈNE P F, LAILA B S, SAMUEL C K, et al. Stability, bioavailability and antifungal activity of reuterin during manufacturing and storage of stirred yoghurt [J]. International Dairy Journal, 2021, 121: 105141.
- [28] 王伟君,李延华,张兰威,等.发酵乳风味及风味物质成份分析[J].通化师范学院学报,2007,28(8):49-51.
- [29] 胡云峰,张静敏,王娜.熟制过程对枸杞子挥发性成分的影响[J].食品工业科技,2020,41(8):256-262.
- [30] 曲云卿,张同刚,刘敦华.不同干燥方式枸杞挥发性风味成分的比较及主成分分析[J].食品工业科技,2015, 36(11):296-300,388.
- [31] 罗倩,田计均,唐媛,等.山葵酸奶工艺及挥发性风味物质研究[J].食品研究与开发, 2020, 41(7):149-158.
- [32] 丹彤,张和平.发酵乳中风味物质的研究进展[J].中国食品学报,2018,18(11):287-292.