优化莲藕酸奶制作工艺的响应面法研究

杨 娇，张子羽

荆楚理工学院食品与生物学院，湖北荆门 448000

摘 要：[目的]以新鲜莲藕、复配复原乳、白砂糖为原料，经复合发酵剂发酵制成具有独特风味的凝固型酸奶。[方法]以莲藕汁添加量、白砂糖添加量、发酵时间及发酵剂接种量为单因素变量，基于响应面法优化莲藕酸奶制作工艺。并以感官评分和酸度为指标，优化莲藕酸奶的制备工艺。[结果]结合感官评分和酸度测定确定最优工艺参数：莲藕汁添加量11.99%、全脂乳粉添加量12.50%、白砂糖添加量6.28%、发酵剂接种量0.12%，在42 ℃下发酵6.24 h。制得莲藕酸奶感官评分为89.80 分，酸度为（98.61±0.95）°T。[结论]莲藕酸奶色泽均匀，乳清析出少，口感绵密，酸甜可口，具有莲藕独特清香和酸奶风味。

关键词：莲藕；凝固型酸奶；响应面法；制作工艺

文章编号：1671-4393（2025）04-0110-08 DOI:10.12377/1671-4393.25.04.19

中国乳业线上阅读

0 引言

酸奶是深受人们偏爱的发酵乳制品。在发酵过程中，酸奶中大分子碳水化合物等营养物质被分解成小分子物质，蛋白质凝结形成小分子的乳块[1]，有利于消化吸收，能促进生长发育；乳酸菌能有效抑制肠道内有害细菌的生长繁殖[2]，改善肠道菌群，还可预防肠道疾病。

莲藕，属莲科植物，微甜而脆，气味有独特清香，富含铁、钙等微量元素以及酚类、维生素等活性物质，可补益气血、清热解渴、增强人体免疫力[3]。莲藕多以菜用和生食，加工产品多见于藕粉、卤制品和糖渍产品。本研究通过预处理新鲜莲藕得到莲藕汁，将其应用于酸奶发酵中，引入莲藕和酸奶的特有风味，对酸奶新口味的开发研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莲藕（鲜嫩、无霉烂、未变质、无机械性损伤），市售；安琪酵母二菌型发酵剂，保加利亚乳杆菌（*Lactobacillus bulgaricus*，简称*Lb.*）和嗜热链球菌（*Streptococcus thermophilus*，简称 *St.*），安琪酵母股份有限公司；白砂糖，符合国家一级白砂糖标准；食品级维生素C、柠檬酸，天津市科密欧化学试

作者简介：杨 娇（1995-），女，湖北宜昌人，硕士，讲师，研究方向为食品安全与营养；
张子羽（2002-），男，湖北宜昌人，本科，研究方向为食品科学与工程。

剂有限公司；L-半胱氨酸，上海展云化工有限公司；氢氧化钠（NaOH）、酚酞、95%乙醇、乙醚、邻苯二甲酸氢钾均为分析纯，天津市福晨化学试剂厂。

电子分析天平（FA224C）、数显恒温水浴锅（HH-4），上海力辰邦西仪器科技有限公司；高压灭菌锅（YXQ-50G），上海博讯医疗生物仪器股份有限公司；破壁机（L18-Y928S），深圳市太宇电子商务有限公司；台式高速冷冻离心机（L530R），湖南湘仪实验仪器开发有限公司；生化培养箱（BSP-100），上海博讯医疗生物仪器股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 工艺流程

见图1。

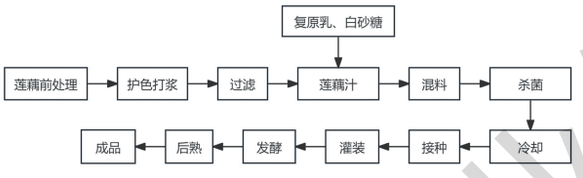


图 1 莲藕酸奶制作工艺流程

（1）莲藕前处理

将新鲜莲藕清洗干净后去蒂削皮，切成厚薄约为0.3 cm的藕片。

（2）护色打浆

莲藕富含多酚氧化酶和鞣质，有较高活性，储存和加工过程中易发生酶促褐变，导致产品颜色过深，故打浆前需用 100 ℃热水烫漂[4]。研究表明，莲藕酸奶发酵液制备过程中，藕片最佳护色配方为：0.20%VC 、0.25%柠檬酸和0.20%L-半胱氨酸[5]，故采用该配方对藕片进行护色。

（3）复原乳的制备

按一定比例将全脂乳粉与纯水搅拌溶解，60 ℃水合30 min[6]，制得复原乳。

（4）混料与杀菌

按一定比例将莲藕汁、白砂糖、复原乳搅拌混匀，90 ℃加热15 min杀菌。

（5）接种、灌装与发酵

将杀菌完成的混合液迅速冷却至约42 ℃，并将菌种接入混合液后灌装至灭菌容器中，封盖，42 ℃发酵至终点。

（6）后熟

将发酵至终点的酸奶迅速冷却，4 ℃冷藏18.00 h，制得莲藕酸奶。

1.2.2 单因素试验

基于接入菌种具有的特性，推荐最优发酵温度为42 ℃，因此本研究将发酵温度设定为42 ℃。并探究莲藕汁添加量、全脂乳粉添加量、白砂糖添加量、发酵时间和发酵剂接种量5 个单因素变量，通过感官评分和酸度测定，确定最佳工艺方案，找到各因素水平的最佳组合。

（1）莲藕汁添加量对莲藕酸奶品质的影响

固定全脂乳粉添加量为12.50%、白砂糖为5.00%、发酵温度为42 ℃，发酵时间6.00 h，发酵剂接种量为0.15%，莲藕汁添加量为单因素变量（5.00%、10.00%、15.00%、20.00%、25.00%），确定最佳莲藕汁添加量。

（2）全脂乳粉添加量对莲藕酸奶品质的影响

固定（1）中最佳莲藕汁添加量、白砂糖添加量为5.00%，发酵剂接种量为0.15%，全脂乳粉添加量为单因素变量（7.50%、10.00%、12.50%、15.00%、17.50%），发酵温度为42 ℃，发酵时间6.00 h，确定最佳全脂乳粉添加量。

（3）白砂糖添加量对莲藕酸奶品质的影响

固定（1）中最佳莲藕汁添加量、（2）中最佳全脂乳粉添加量，发酵剂接种量为0.15%，白砂糖添加量为单因素变量（4.00%、5.00%、6.00%、7.00%、8.00%），发酵温度为42 ℃，发酵时间6.00 h，确定最佳白砂糖添加量。

（4）发酵剂接种量对莲藕酸奶品质的影响

固定（1）中最佳莲藕汁添加量、（2）中最佳全脂乳粉添加量及（3）中最佳白砂糖添加量，发酵剂接种量为单因素变量（0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%），发酵温度为42 ℃，发酵时间6.00 h，确定最佳发酵剂接种量。

中国乳业杂志网读

（5）发酵时间对莲藕酸奶品质的影响

固定（1）至（4）中其他条件的最佳水平，发酵时间为单因素变量（4.00 h、5.00 h、6.00 h、7.00 h、8.00 h），发酵温度为42 ℃，确定最佳发酵时间。

1.2.3 响应面法优化试验

莲藕酸奶发酵过程中有较多因素影响成品品质，本研究基于单因素试验结果，选取莲藕汁添加量（A）、白砂糖添加量（B）、发酵剂接种量（C）和发酵时间（D）作为关键变量，以莲藕酸奶感官评分和酸度为响应值，根据Box-Behnken响应面法试验原理，设计4 个因素、每个因素3 个水平的响应面试验方案，优化并确定最佳莲藕酸奶制作工艺。试验因素与水平见表1。

表 1 响应面试验因素与水平表

水平	因素			
	A 莲藕汁添加量（%）	B 白砂糖添加量（%）	C 发酵剂接种量（%）	D 发酵时间（h）
1	5.00	5.00	0.05	5.00
0	10.00	6.00	0.10	6.00
−1	15.00	7.00	0.15	7.00

1.2.4 指标测定方法

（1）酸度测定

采用《GB 5009.239—2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定》中酚酞指示剂法测定酸度[7]。用pH计测定pH值。

（2）持水力测定

精确称量10 g莲藕酸奶成品，3 000 r/min离心处理10 min，离心完成后移除上清液，称量并记录离心管中的沉淀物，随后用下列公式计算所得数据：

持水力（%）=沉淀质量（g）/莲藕酸奶质量（g）×100%[8]

（3）感官评分

感官评分标准遵循《GB 19302—2010 食品安全国家标准 发酵乳》[9]制定，评价小组由10 位感官功能正常且具备客观评价能力的品评员构成，评价莲藕酸奶时，综合考量口感、色泽、滋味气味和组织状态4 个维度，最终感官评分为品评员给出分数的算术平均值。具体感官评分标准见表2。

表 2 莲藕酸奶感官评分标准

指标	评分标准	评分区间（分）
口感（15 分）	入口细腻、有稠厚感、口感较好	12 ~ 15
	较细腻、润滑、稠厚感不强或较稀薄	9 ~ 11
	较粗糙、有沙粒感、口感较差	0 ~ 8
色泽（15 分）	色泽均匀一致	12 ~ 15
	色泽不均匀、略有分层	9 ~ 11
	色泽差、有沉淀现象	0 ~ 8
滋味气味（40 分）	酸甜适口、有莲藕和发酵乳独特香气	30 ~ 40
	酸味或甜味偏重、莲藕和酸奶风味不浓、香气较淡	21 ~ 29
	酸味或甜味过重、莲藕风味较淡、无发酵奶固有香气	0 ~ 20
组织状态（30 分）	组织细腻、均匀，有少量乳清析出	21 ~ 30
	凝乳较均匀、有乳清析出	11 ~ 20
	凝乳不均匀、乳清析出严重	0 ~ 10

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 全脂乳粉添加量对莲藕酸奶品质的影响

酸奶的凝固状态和黏稠度与添加乳粉比例有较大关系，适宜添加乳粉能在发酵过程中有效提高发酵体系黏度，减少乳清析出，缩短凝乳时间，提高发酵效率[10~11]。莲藕汁、白砂糖添加量和发酵剂接种量分别为15.00%、5.00%和0.10%条件下，探究7.50%、10.00%、12.50%、15.00%、17.50%全脂乳粉添加量对莲藕酸奶品质的影响。将接种后产品置于4 ℃后熟18.00 h，对制得莲藕酸奶成品进行感官评分和酸度测定。

全脂乳粉添加量对莲藕酸奶品质的影响见图2。莲藕酸奶的感官评分随全脂乳粉添加量的增加呈“山峰型”先升后降趋势，莲藕酸奶酸度随添加量的增加不断升高。研究过程中，全脂乳粉添加量低于12.50%时，莲藕酸奶质地过稀且口感较淡；全脂乳粉添加量为12.50%时，莲藕酸奶具有莲藕特有风味，凝固状态较好，口感醇厚，感官评分达89.00 分，酸

中国乳业线上阅读

度为91.75 °T，达到风味和质地较理想状态。随着全脂乳粉的进一步添加，莲藕特有风味逐渐减弱，质地逐渐变得粗糙，略带沙粒感。经综合评价，后续试验暂定全脂乳粉添加量为12.50%。

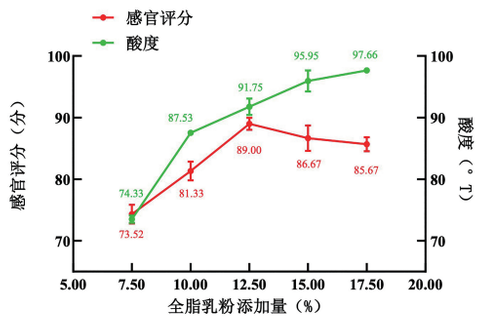


图 2 全脂乳粉添加量对莲藕酸奶品质的影响

2.1.2 莲藕汁添加量对莲藕酸奶品质的影响

全脂乳粉添加量为12.50%，白砂糖添加量为6.00%，发酵剂接种量为0.10%。将混合液充分混匀灭菌后，控制莲藕汁添加量（5.00%、10.00%、15.00%、20.00%、25.00%），发酵剂接种量按0.10%的比例接种，随后将接种后产品置于4 ℃后熟18.00 h，对制得莲藕酸奶成品进行和感官评分和酸度测定。

莲藕汁添加量对莲藕酸奶品质的影响见图3。随着莲藕汁添加量增加，莲藕酸奶感官评分和酸度变化整体呈“山峰型”趋势先升后降。莲藕汁添加量较低时，无莲藕特有风味，整体风味提升不明显。莲藕汁添加量为10.00%时，具有莲藕特有风味，达到较适口的风味，此时酸度为96.87 °T。随莲藕汁添加量的进一步增加，莲藕特有风味逐渐浓厚，同时出现色泽不匀，略有分层，乳清析出较多现象。故确定最佳莲藕汁添加量为10.00%。

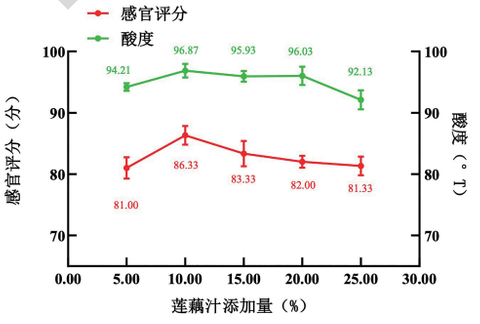


图 3 莲藕汁添加量对莲藕酸奶品质的影响

2.1.3 白砂糖添加量对莲藕酸奶品质的影响

白砂糖在酸奶发酵过程担任菌体碳源角色[12]，起到改善酸奶风味的作用。白砂糖添加量过多或过少会影响菌体的增殖和酸奶的感官评分[13]。控制全脂乳粉添加量为12.50%，莲藕汁添加量为10.00%，控制白砂糖添加量为4.00%、5.00%、6.00%、7.00%、8.00%，按发酵剂接种量为0.10%接种，置于4 ℃后熟18.00 h，对制得莲藕酸奶产品进行感官评分和酸度测定。

白砂糖添加量对莲藕酸奶品质的影响见图4。随白砂糖添加量的增加，感官评分和酸度变化呈“山峰型”趋势，感官评分变化较显著，而酸度变化相对较平和。当白砂糖添加量较少时，莲藕酸奶有明显酸涩感，口感不佳。白砂糖添加量为6.00%时，莲藕酸奶评分达89.33 分，酸度为98.84 °T，整体风味及质地最佳。然而进一步提高白砂糖添加量，则使莲藕酸奶甜味过于厚重，不符合大健康环境下对健康饮食的要求。故确定白砂糖最佳添加量为6.00%。

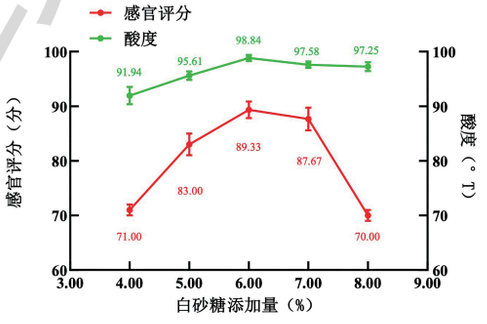


图 4 白砂糖添加量对莲藕酸奶品质的影响

2.1.4 发酵剂接种量对莲藕酸奶品质的影响

发酵剂接种量是酸奶成熟时间的重要影响因素之一，也在一定程度上影响生产资源的利用率。乳制品发酵过程中，接种量不足常引发显著问题，如凝乳状态不理想；而接种量过高会导致产酸速率过快，导致乳清过度分离，造成原材料资源浪费，增加生产成本[14]。探究发酵剂接种量对莲藕酸奶品质的影响过程中，设定全脂乳粉、莲藕汁及白砂糖添加量分别为12.50%、10.00%、6.00%，各原料充分混匀，灭菌后按0.05%、0.10%、0.15%、0.20%及0.25%的比例接种发酵剂，置于4 ℃后熟18.00 h，对制得莲

中国乳业线上阅读

藕酸奶产品进行感官评分和酸度测定。

发酵剂接种量对莲藕酸奶品质的影响见图5。随着发酵剂接种量的增加，莲藕酸奶的感官评分呈“山峰型”趋势，而酸度随发酵剂接种量的增加而逐步升高，但接种量超过0.10%时，酸度的变化趋势不显著。莲藕酸奶感官评分最高点时发酵剂接种量为0.10%，酸度为96.02 °T，风味及质地最佳。随发酵剂接种量的进一步增加，则使莲藕酸奶酸味过重、乳清大量析出，影响整体风味。故确定最佳发酵剂接种量为0.10%。

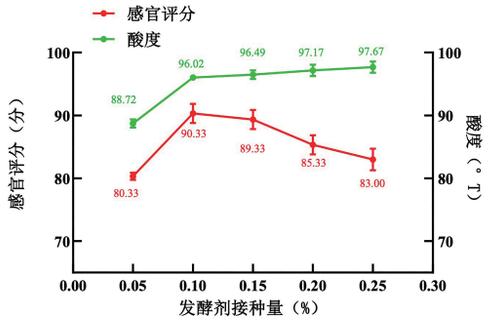


图 5 发酵剂接种量对莲藕酸奶品质的影响

2.1.5 发酵时间对莲藕酸奶品质的影响

探究发酵时间对莲藕酸奶品质的影响过程中，以12.50%的全脂乳粉添加量、10.00%的莲藕汁添加量，6.00%的白砂糖添加量及0.10%的发酵剂接种量进行接种，42 ℃发酵4.00 h、5.00 h、6.00 h、7.00 h、8.00 h，置于4 ℃后熟18.00 h，对制得莲藕酸奶产品进行感官评分和酸度测定。

发酵时间对莲藕酸奶品质的影响结果见图6。随着发酵时间的增长，莲藕酸奶的感官评分呈“山峰型”趋势，发酵时间较短时，产酸较少，酸奶风味不明显。经6.00 h发酵的莲藕酸奶的口感最佳，风味浓郁，整体状态较理想。莲藕酸奶酸度随发酵时间的延长呈增长趋势，发酵时间超过6.00 h后，乳清析出明显，导致莲藕酸奶口感和风味不佳。故确定最佳发酵时间为6.00 h。

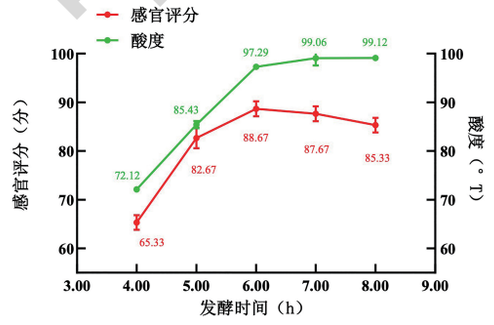


图 6 发酵时间对莲藕酸奶品质的影响

2.2 响应面法优化试验结果

2.2.1 Box–Behnken响应面法试验结果及方差分析

根据单因素试验优化成果，进一步采用Box–Behnken响应面法试验方对莲藕酸奶制备工艺进行深入优化[15]。将莲藕汁添加量（A）、白砂糖添加量

表 3 响应面法试验设计方案及结果

试验序号	莲藕汁添加量A（%）	白砂糖添加量B（%）	发酵剂接种量C（%）	发酵时间D（h）	感官评分（分）	酸度（°T）
1	5.00	5.00	0.10	6.00	80.00	88.60
2	15.00	5.00	0.10	6.00	84.00	87.46
3	5.00	7.00	0.10	6.00	83.00	87.38
4	15.00	7.00	0.10	6.00	82.00	89.62
5	10.00	6.00	0.05	5.00	76.00	80.18
6	10.00	6.00	0.15	5.00	82.00	95.10
7	10.00	6.00	0.05	7.00	83.00	96.07
8	10.00	6.00	0.15	7.00	83.00	96.65
9	5.00	6.00	0.10	5.00	75.00	82.70
10	15.00	6.00	0.10	5.00	77.33	85.36
11	5.00	6.00	0.10	7.00	81.00	91.27
12	15.00	6.00	0.10	7.00	82.00	93.06
13	10.00	5.00	0.05	6.00	85.33	91.12
14	10.00	7.00	0.05	6.00	82.33	89.65
15	10.00	5.00	0.15	6.00	82.00	93.76
16	10.00	7.00	0.15	6.00	87.00	102.59
17	5.00	6.00	0.05	6.00	80.33	85.08
18	15.00	6.00	0.05	6.00	82.00	85.66
19	5.00	6.00	0.15	6.00	82.00	91.78
20	15.00	6.00	0.15	6.00	80.00	93.01
21	10.00	5.00	0.10	5.00	79.00	89.64
22	10.00	7.00	0.10	5.00	82.00	92.16
23	10.00	5.00	0.10	7.00	86.33	96.26
24	10.00	7.00	0.10	7.00	84.00	99.71
25	10.00	6.00	0.10	6.00	90.00	98.65
26	10.00	6.00	0.10	6.00	90.67	98.22
27	10.00	6.00	0.10	6.00	90.33	101.57
28	10.00	6.00	0.10	6.00	91.00	98.98
29	10.00	6.00	0.10	6.00	90.33	98.22

中国乳业线上阅读

（B）、发酵剂接种量（C）和发酵时间（D）作为关键变量，将感官评分和酸度作为响应值，系统探究这些因素对莲藕酸奶品质综合影响，确定最佳制作工艺参数组合。具体试验设计和结果见表3。

对试验数据进行回归分析，可获得莲藕酸奶感官评分和酸度与莲藕汁添加量、白砂糖添加量、发酵剂接种量以及发酵时间4 个因素间的二次多项回归方程：

感官评分（分）=90.40+0.50*A+0.33*B+0.67*C+2.33*D−1.25*A*B−1.00*A*C−0.25*A*D+2.00*B*C−1.25*B*D−1.50*C*D−5.82*A2−2.32*B2−3.83*C2−5.58*D2

酸度（°T）=99.13+0.61*A+1.19*B+3.76*C+3.99*D+0.84*A*B+0.16*A*C−0.22*A*D+2.57*B*C+0.23*B*D−3.58*C*D−7.94*A2−2.06*B2−2.98*C2−3.29*D2

式中A：莲藕汁添加量（%）；B：白砂糖添加量（%）；C：发酵剂接种量（%）；D：发酵时间（h）。

分析数据得出该模型具有极高的统计显著性（P<0.01），而失拟项并不显著（P>0.05）。考察一次项的F值，可推断出各因素对莲藕酸奶感官评分的影响：其中，发酵时间对感官评分的影响最显著，其次是发酵剂接种量，再次是莲藕汁添加量，而白砂糖添加量对感官评分的影响相对较小。

感官评分的数据分析结果表明，一次项D、交互项AB、BC、BD、CD及二次项A2、B2、C2、D2对莲藕酸奶感官评分具有极其显著的影响（P<0.01）。同时，一次项C和交互项AC对莲藕酸奶感官评分的影响也较为显著（P<0.05）。相比之下，其他因素交互作用对感官评分的影响未达统计学显著性（P>0.05）。

回归分析构建的模型展现出高度拟合优度和可靠性，这分别由0.981 0和0.961 9的相关系数R^2和调整后的相关系数R^2Adj证实。此外，变异系数作为评估模型稳定性的另一关键指标，其数值为1.00%，远低于10%的标准，进一步验证了试验结果的可靠性。因此可用该回归分析模型预测莲藕酸奶感官评分（表4）。

表 4 莲藕酸奶感官评分回归分析模型的方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型（Model）	499.748	14.00	35.696	51.520	< 0.000 1
A– 莲藕汁添加量	3.000	1.000	3.000	4.330	0.056 3
B– 白砂糖添加量	1.333	1.000	1.333	1.924	0.187 1
C– 发酵剂接种量	5.333	1.000	5.333	7.698	0.014 9
D– 发酵时间	65.333	1.000	65.333	94.296	< 0.000 1
AB	6.250	1.000	6.250	9.021	0.009 5
AC	4.000	1.000	4.000	5.773	0.030 7
AD	0.250	1.000	0.250	0.361	0.557 6
BC	16.000	1.000	16.000	23.093	0.000 3
BD	6.250	1.000	6.250	9.021	0.009 5
CD	9.000	1.000	9.000	12.990	0.002 9
A^2	220.091	1.000	220.091	317.656	< 0.000 1
B^2	35.064	1.000	35.064	50.607	< 0.000 1
C^2	94.901	1.000	94.901	136.971	< 0.000 1
D^2	201.604	1.000	201.604	290.975	< 0.000 1
残差	9.700	14.000	0.693	—	—
失拟项	8.500	10.000	0.850	2.833	0.163 7
纯误差	1.200	4.000	0.300	—	—
总变异	509.448	28.000	—	—	—

莲藕酸奶酸度分析结果表明，一次项B、C、D，交互项BC、CD和二次项A2、B2、C2、D2对酸度有极显著影响（P<0.01）。相比之下，其他因素对酸度的影响并达统计学显著性（P>0.05）。

在建立的回归分析模型中，相关系数R^2和R^2Adj分别为0.971 3与0.942 6，指示模型具有较高拟合优度和可靠性。此外，变异系数作为衡量试验重复性的重要指标，其数值应控制在10%以下，确保试验结果的稳定性和可靠性。该模型变异系数为1.49%，远低于10%的标准，表明试验具有可靠性，因此可用此回归分析模型预测莲藕酸奶的酸度（表5）。

2.2.2 各因素交互作用响应面分析

各因素交互作用对莲藕酸奶感官评分影响的响应面和等高线分析结果见图7。莲藕酸奶的感官评分随4 个单因素增加呈“山峰型”趋势。可直观看出莲

中国乳业线上阅读

表 5 莲藕酸奶酸度回归分析模型的方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	*P* 值
模型（Model）	903.458	14.000	64.533	33.857	< 0.000 1
A– 莲藕汁添加量	4.514	1.000	4.514	2.368	0.146 1
B– 白砂糖添加量	16.969	1.000	16.969	8.903	0.009 9
C– 发酵剂接种量	169.726	1.000	169.726	89.048	< 0.000 1
D– 发酵时间	191.041	1.000	191.041	100.230	< 0.000 1
AB	2.856	1.000	2.856	1.498	0.241 1
AC	0.106	1.000	0.106	0.055	0.817 3
AD	0.189	1.000	0.189	0.099	0.757 3
BC	26.523	1.000	26.523	13.915	0.002 2
BD	0.216	1.000	0.216	0.113	0.741 3
CD	51.409	1.000	51.409	26.972	0.000 1
A^2	408.528	1.000	408.528	214.336	< 0.000 1
B^2	27.655	1.000	27.655	14.509	0.001 9
C^2	57.500	1.000	57.500	30.167	< 0.000 1
D^2	70.150	1.000	70.150	36.804	< 0.000 1
残差	26.684	14.000	1.906	—	—
失拟项	18.822	10.000	1.882	0.958	0.568 2
纯误差	7.863	4.000	1.966	—	—
总变异	930.143	28.000	—	—	—

藕汁与白砂糖添加量间的交互作用对莲藕酸奶的感官评分有极显著影响（$P<0.01$）；白砂糖添加量、发酵剂接种量和发酵时间两两间的交互作用对莲藕酸奶感官评分有极显著影响（$P<0.01$），而莲藕汁添加量与其他因素间的交互作用对莲藕酸奶感官评分无显著影响（$P>0.05$）。

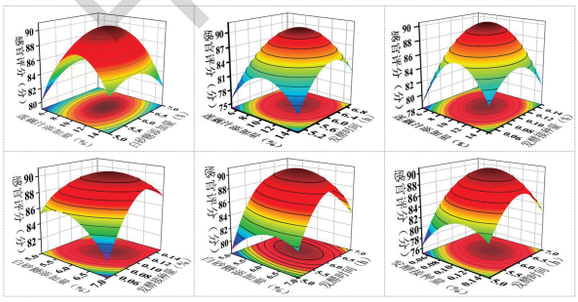


图 7 各因素交互作用对莲藕酸奶感官评分影响的响应面及等高线

各因素交互作用对莲藕酸奶酸度影响的响应面和等高线分析结果见图8，莲藕酸奶酸度随4 个单因素影响呈“山峰型”趋势。可直观看出白砂糖添加量与发酵剂接种量、发酵剂接种量与发酵时间，两两间的交互作用对莲藕酸奶酸度有极显著影响（$P<0.01$），而莲藕汁添加量与其他影响因素两两间的交互作用对莲藕酸奶酸度无显著影响（$P>0.05$）；白砂糖添加量与发酵时间两两间的交互作用对莲藕酸奶酸度有不显著影响（$P>0.05$）。

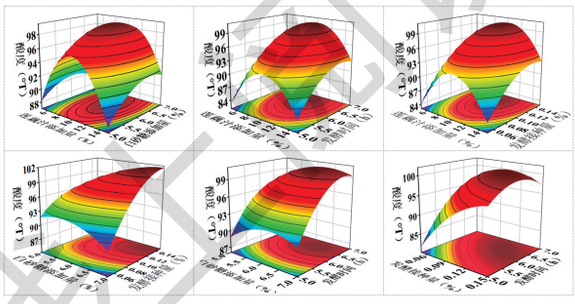


图 8 各因素交互作用对莲藕酸奶酸度影响的响应面及等高线

2.2.3 响应面法优化试验结果验证

通过Design–ExpertV8.0.6软件优化莲藕酸奶发酵工艺，提高感官评分并使其酸度适宜。综合感官评分和酸度响应面分析得出最佳工艺参数为：莲藕汁添加量为11.99%、白砂糖添加量为6.28%、发酵剂接种量为0.12%、发酵时间为6.24 h，预测制得莲藕酸奶感官评分达89.80 分，酸度为99.99 °T。为验证模型的可靠性，在最佳工艺下重复3 次试验，得到实际感官评分为（89.31 ± 1.07）分，持水度为（76.42 ± 0.81）%，pH值为4.21 ± 0.02，酸度为（98.61 ± 0.95）°T。试验所得数据与分析预测结果高度吻合，验证该优化工艺可行性。此外，该回归分析模型对莲藕酸奶发酵工艺的预测分析显示出良好的可靠性。

3 结论

本研究通过单因素试验及Box–Behnken响应面法建立二次多项式回归分析模型，显示感官评分和

中国乳业编辑部

酸度与发酵工艺间存在显著交互作用。优化了莲藕酸奶的制备工艺，确定了莲藕酸奶的最优制备工艺为：全脂乳粉添加量为12.50%、莲藕汁添加量为11.99%、白砂糖添加量6.28%、发酵剂接种量0.12%、42 ℃下发酵6.24 h，置于4 ℃后熟18.00 h，制得莲藕酸奶质地适宜、口感细腻、酸甜适宜，具有莲藕独特清香，酸度为98.61 ° T，持水度为77.32%，pH值为4.20，感官评分达89.62 分。由于影响莲藕酸奶制备工艺的影响因素较多，本试验在单因素及响应面关键因素的选取中也存在一定的局限性，可能影响了优化结果的全面性。在后续研究中将更加优化变量选择，并增强模型的验证。莲藕型发酵产品有广阔应用前景，莲藕酸奶制作工艺优化为莲藕酸奶发展提供了新动力，也为莲藕等天然资源开发利用和深加工提供参考。

参考文献

[1] 王淑娟，杨冬霞.酸奶的营养与保健功能探析[J].科技创业家，2013（1）：214.

[2] 祝烨媛.新型燕麦酸奶及其副产品开发研究[D].成都：成都大学，2023.

[3] 高继明.莲藕[J].湖南中医杂志，2022，38（10）：98.

[4] 莫明规，梁伟君，张岚菁，等.凝固型莲藕汁发酵酸奶的生产工艺研究[J].食品与发酵科技，2017，53（5）：116–121.

[5] 李杰，罗建成，程爽，等.莲藕酸奶–发酵液的制备研究[J].食品研究与开发，2016，37（23）：90–93.

[6] 王昊乾，李伯海，赵景娜，等.瑞士乳杆菌H11发酵乳饮料的ACE抑制活性及代谢组学研究[J].食品工业科技，2021，42（22）：112–117.

[7] 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 食品酸度的测定[S].

[8] 王鑫磊，王萌，闫春晓，等.马乳酒样乳杆菌ZW3对酸奶风味及质构的影响[J].食品科学，2022，43（10）：119–123.

[9] 中华人民共和国卫生部.GB 19302—2010 食品安全国家标准 发酵乳[S].

[10] 刘敏.红枣膳食纤维酸奶的研制[D].保定：河北农业大学，2015.

[11] 程浩，谢有发，马晓娟，等.响应面法优化葛根酸奶发酵工艺[J].中国食品添加剂，2023，34（4）：174–181.

[12] 王婷.苦荞花生复合发酵酸奶的研制[D].咸阳：西北农林科技大学，2013.

[13] 常嘉乐，张婷，袁亚宏，等.藜麦酸奶混菌发酵工艺优化及品质与风味评价[J].食品工业科技，2021，42（18）：197–208.

[14] 李雪，张慧敏，许谦，等.桑黄风味酸奶发酵工艺优化[J].中国酿造，2022，41（5）：194–198.

[15] 黄娟，吴思翰，廖高锋，等.响应面法优化经UHT处理全脂复原调制乳乳化稳定体系的研究[J].中国乳业，2024（9）：97–104，110.

Study on Response Surface Method to Optimize the Production Process of Lotus Root Yogurt

YANG Jiao，ZHANG Ziyu

College of Food and Biology，Jingchu University of Technology，Jingmen Hubei 448000

Abstract：[Objective] With fresh lotus root，mixed recovery milk and white sugar as raw materials，the coagulated yogurt with unique flavor was prepared by composite fermentation.[Method]The production process of lotus root yogurt was optimized based on response surface method with the addition amount of lotus root juice，white sugar，fermentation time and starter inoculated amount as single-factor variables. The preparation technology of lotus root yogurt was optimized based on the sensory score and acidity.[Result]The optimal parameters were determined by sensory score and acidity determination:：lotus root juice added 11.99%，whole milk powder added 12.50%，white sugar added 6.28%，starter inoculated 0.12%，and fermented at 42 ℃ for 6.24 h.The sensory score of lotus root yogurt was 89.80 points，and the acidity was（98.61±0.95）°T.[Conclusion]Lotus root yogurt has uniform color，less whey precipitation，soft taste，sweet and sour taste，with unique fragrance of lotus root and yogurt.

Keywords：lotus root；coagulated yogurt；response surface method；production technology

中国乳业线上阅读