

## 牦牛酥油粉制备工艺优化

罗丽<sup>1,2</sup>, 宋礼<sup>1,2</sup>, 曾国福<sup>3</sup>, 崔广智<sup>1,2</sup>, 姚娜<sup>1,2</sup>, 张晓梅<sup>1</sup>

(1. 甘肃华羚乳品股份有限公司, 甘肃甘南 747000; 2. 甘南牦牛乳研究院, 甘肃甘南 747000;

3. 甘肃新伟创检测科技有限公司, 兰州 730000)

**摘要:**旨在拓展酥油的应用领域,以牦牛酥油为原料,采用脂肪酶酶解、微胶囊包埋技术制备酥油粉。对微胶囊制备过程中的酥油用量、 $\beta$ -环状糊精用量、酪蛋白酸钠用量、乳化温度、均质压力、喷雾干燥质量浓度对包埋率的影响进行单因素和响应面试验考察,测定酥油粉的理化指标及感官品质,并对比分析酥油与酥油粉的脂肪酸组成及含量变化。结果表明:优化的微胶囊制备工艺条件为酥油用量 38.5%、 $\beta$ -环状糊精用量 45%、酪蛋白酸钠用量 4%、乳化温度 60℃、均质压力 32 MPa、喷雾干燥质量浓度 48 g/100 mL,在此条件下产品包埋率为 94.6%,产品水分含量、总脂肪含量、过氧化值以及表面油含量均符合 QB/T 4791—2015《植脂末》的规定;与酥油相比,酥油粉的短链饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸相对含量增加,单不饱和脂肪酸相对含量降低。综上,采用脂肪酶酶解、微胶囊包埋技术可实现对酥油脂肪酸组分调整、改善酥油风味,延缓酥油脂肪酸氧化的目的,制备的酥油粉可作为功能性食品的原料,从而拓宽酥油的应用领域。

**关键词:**酥油;酥油粉;酶解;微胶囊包埋;脂肪酸

中图分类号:TS252.42;TS221 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)12-0092-08

## Optimization of yak butter powder preparation process

LUO Li<sup>1,2</sup>, SONG Li<sup>1,2</sup>, ZENG Guofu<sup>3</sup>, CUI Guangzhi<sup>1,2</sup>,  
YAO Na<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaomei<sup>1</sup>

(1. Gansu Hualing Dairy Co., Ltd., Gannan 747000, Gansu, China; 2. Gannan Yak Milk Research

Institute, Gannan 747000, Gansu, China; 3. Gansu Xinweichuang Detection

Technology Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to expand the application field of yak butter, using yak butter as raw material, lipase enzyme hydrolysis and microcapsule embedding technology were used to prepare yak butter powder. The effect of amounts of yak butter,  $\beta$ -cyclodextrin and sodium casein, emulsification temperature, homogeneous pressure, and spray drying mass concentration on the embedding rate in the process of microcapsule preparation were studied by single factor experiment and response surface experiment, the physicochemical indexes and sensory quality of yak butter powder were determined, and the fatty acid composition and content in yak butter and yak butter powder were compared. The results showed that the optimal microcapsule preparation process conditions were yak butter amount 38.5%,  $\beta$ -cyclodextrin amount 45%, sodium casein amount 4%, emulsification temperature 60℃, homogeneous pressure 32 MPa, spray drying mass concentration 48 g/100 mL. Under these conditions, the embedding rate was 94.6%, and the moisture content, fat content, peroxide value and surface oil content of the product in line with the provisions of QB/T 4791-2015 *Creamer*. Compared with yak butter, the relative contents

of short chain saturated fatty acid and polyunsaturated fatty acid in yak butter powder increased, and the relative content of monounsaturated fatty acid decreased. To sum up, using lipase enzymolysis and microcapsule embedding technology can adjust the yak butter

收稿日期:2023-05-16;修回日期:2024-06-19

基金项目:甘南州科技计划项目(2022JY2NC001);企业研发机构能力建设专项(22CX8JP250)

作者简介:罗丽(1987),女,高级工程师,硕士,研究方向为食品科学(E-mail)1072838931@qq.com。

fatty acid components, improve the flavor of yak butter, and delay the oxidation of yak butter fatty acid. The yak butter powder can be used as the raw material of functional food, so as to broaden the application field of yak butter.

**Key words:** yak butter; yak butter powder; enzymolysis; microcapsule embedding; fatty acid

牦牛酥油(牦牛乳脂肪,以下简称“酥油”)是藏区牧民日常饮食不可或缺的食物之一,占牧民脂肪摄入量的15%~32%,在维持青藏高原牧民身体健康方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。研究发现,酥油富含共轭亚油酸、维生素A、单不饱和脂肪酸、*n*-3长链多不饱和脂肪酸,在改善认知成熟度、抗心血管疾病、抗癌、抗肥胖以及控制神经系统方面具有重要作用<sup>[2]</sup>。此外,酥油对人体乳腺癌细胞的生长有明显的抑制作用<sup>[3-4]</sup>,可作为潜在的功能性食品成分。未经精炼的酥油中含有较多胶溶性杂质,且酥油中高含量的水分和长链多不饱和脂肪酸导致酥油不稳定,易被水解和氧化,易受微生物污染,从而导致其腐败、霉变等<sup>[5-6]</sup>。乳脂肪富含的短链和中链脂肪酸,是乳类食品重要的香气来源,但这些脂肪酸易被氧化分解,导致风味下降。通过酶解和特异性控制,可使乳脂肪呈现饱满、似黄油风味和干酪风味,从而改善了食品的风味,达到了酶解增香的目的<sup>[7-8]</sup>。另外,微胶囊可以有效防止芯材跟外界接触,起到延缓氧化和风味物质在储藏期间释放的作用<sup>[9]</sup>。

本研究利用脂肪酶酶解结合微胶囊包埋的方式制备酥油粉,以包埋率为衡量指标,通过单因素试验和响应面试验优化酥油粉制备工艺,测定酥油粉的品质指标,并与酥油的脂肪酸组成及含量进行对比,探讨酶解对脂肪酸的作用,以期为提高酥油的应用价值、拓展酥油粉的应用领域、促进高附加值酥油食品的开发提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

酥油,采自甘南州合作市; $\beta$ -环状糊精,山东大旭生物工程有限公司;乳清蛋白粉,新西兰恒天然集团;酪蛋白酸钠,和政县华龙乳制品有限公司;脂肪酶4080(POWER Bake@4080),丹尼斯克公司;蔗糖脂肪酸酯、蒸馏单硬脂酸甘油酯、硬脂酰乳酸钠、六偏磷酸钠、磷酸氢二钾,河南仟味源食品添加剂有限公司。

7820A气相色谱仪(配有氢火焰离子检测器FID),美国安捷伦公司;DK-98-IIA恒温水浴锅,天津市泰斯特仪器有限公司;FA135S分析天平,上海精密仪器仪表有限公司;TG16-WS离心机,长沙湘仪离心机仪器有限公司;GSHL01-2000乳化剪

切罐、RZGC05-2000溶解罐、RGYP1000喷雾干燥机,中轻机乳品设备有限责任公司;SRH10000-30高压均质机,上海申鹿均质机有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 酥油粉的制备

参考文献<sup>[7,10]</sup>并稍作调整制备酥油粉,具体制备工艺流程如下。

酥油→熔化→加入脂肪酶酶解→灭酶→  
加亲油性乳化剂→剪切溶解→混合→加稳定剂→  
↑

壁材与亲水性乳化剂→剪切溶解  
高压均质→喷雾干燥→酥油粉

主要操作步骤及工艺参数。

(1)酥油酶解:加入酥油质量1%的脂肪酶酶解,酶解温度40℃,酶解时间2h,酶解pH6~8。

(2)灭酶:将酶解后的酥油于85℃灭酶15min。

(3)芯材乳化:向灭酶的酥油中加入亲油性乳化剂单硬脂酸甘油酯与硬脂酰乳酸钠(质量比1:1),添加量为酥油质量的4.5%。

(4)壁材乳化:将 $\beta$ -环状糊精、乳清蛋白粉混合后,加入亲水性乳化剂酪蛋白酸钠与蔗糖脂肪酸酯(质量比4:0.5)。

(5)料液均质:将壁材料液与芯材料液混合,在一定温度下乳化,充分搅拌后在65℃以一定均质压力均质30min。

(6)喷雾干燥:将均质后的料液进行喷雾干燥,控制喷雾干燥出风温度65℃,高压泵压力17MPa,出料密度1115kg/m<sup>3</sup>。

#### 1.2.2 包埋率的计算

表面油含量参照QB/T4791—2015《植脂末》附录A方法进行测定。按下式计算包埋率(*x*)。

$$x = \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\omega$ 、 $\omega_0$ 分别为表面油及总脂肪含量。

#### 1.2.3 感官评价

选5~10人对制备的酥油粉进行感官评价,对各评价指标进行打分,通过各评价员打分的均值得出各感官指标得分,通过各指标均值总和得出产品总感官得分。产品感官评价指标及评价标准见表1。

表1 感官评价指标及评价标准

Table 1 Sensory evaluation indicators and evaluation criteria

指标	标准	分值(分)
色泽(10分)	白色至乳白色	9~10
	乳白色或乳黄色	7~8
	焦黄色	0~6
组织状态(20分)	粉末状,无结块,无肉眼可见外来杂质	16~20
	粉末状,有少量结块,有极少量杂质或焦粒	11~15
	粉末状,有结块,有少量杂质或焦粒	0~10
滋气味(20分)	奶香味浓郁,具有牦牛乳特有风味,无异味,膻味较淡	16~20
	奶香味较淡,具有牦牛乳特有风味,无异味,膻味略重	11~15
	奶香味不足,具有牦牛乳特有风味,无异味,膻味较重	0~10
冲调状态(20分)	溶解后无沉淀或上浮团块	16~20
	溶解后有少量沉淀或上浮团块	11~15
	溶解后有较多沉淀或上浮团块	0~10
	冲调后奶味浓郁,口感浓厚	21~30
口感(30分)	冲调后奶味略淡,口感略稀薄	16~20
	溶解快,奶味淡,口感稀薄	0~15

#### 1.2.4 酥油粉理化指标测定

水分含量,参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测定;蛋白质含量,参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》进行测定;总脂肪含量,参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行测定;过氧化值,参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》进行测定。

#### 1.2.5 酥油脂肪酸组成分析

参照 GB 5009.168—2016,采用乙酰氯-甲醇法进行样品前处理,采用气相色谱外标法测定酥油脂肪酸组成及含量。

样品前处理:准确称取 0.5 g 酥油(精确到 0.1 mg)于 25 mL 干燥的螺口玻璃管中,依次加入 5.0 mL 甲苯、6 mL 体积分数 10% 的乙酰氯-甲醇溶液,旋紧螺旋盖振荡混合,于  $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$  水浴 2 h(期间每隔 20 min 取出振摇 1 次)后取出冷却至室温。将反应后的样液转移至 50 mL 离心管中,用 3 mL 碳酸钠溶液清洗玻璃管 3 次,合并碳酸钠溶液于 50 mL 离心管中混匀。5 000 r/min 离心 5 min,取上清液进气相色谱仪分析。

气相色谱条件:聚二氧丙基硅氧烷强极性毛细管色谱柱(100 m  $\times$  250  $\mu\text{m}$   $\times$  0.2  $\mu\text{m}$ );进样器温度 270  $^\circ\text{C}$ ;检测器温度 280  $^\circ\text{C}$ ;升温程序为初始温度 100  $^\circ\text{C}$ ,保持 13 min,以升温速率 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$  升至 180  $^\circ\text{C}$  并保持 6 min,以升温速率 3  $^\circ\text{C}/\text{min}$  升至 200  $^\circ\text{C}$  并保持 30 min,以升温速率 4  $^\circ\text{C}/\text{min}$  升至 230  $^\circ\text{C}$  并保持 20 min;载气为氮气,流速 25 mL/min,压力 0.22 MPa;

分流比 100:1;进样量 1.0  $\mu\text{L}$ 。

采用脂肪酸甲酯标准溶液的保留时间定性,各脂肪酸色谱峰面积外标法定量。

#### 1.2.6 数据处理

所有试验进行 3 次重复,数据采用 Excel 进行处理,各检测结果采用“平均值  $\pm$  标准误差”表示,用 Design-Expert 10.0 软件进行响应面设计和结果分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 酥油粉制备单因素试验

#### 2.1.1 酥油用量对酥油粉感官、包埋率的影响

固定  $\beta$ -环状糊精用量为 43%、酪蛋白酸钠用量为 5%、乳化温度为 60  $^\circ\text{C}$ 、均质压力为 28 MPa、喷雾干燥质量浓度为 46 g/100 mL,考察酥油用量对酥油粉感官、包埋率的影响,结果见图 1。

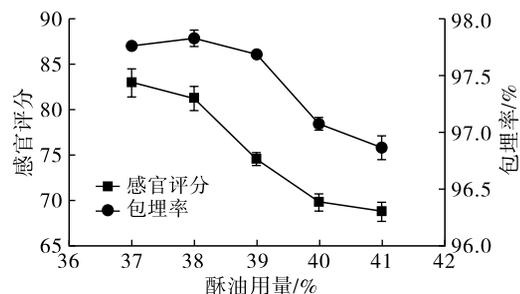


图1 酥油用量对酥油粉感官、包埋率的影响

Fig. 1 Effect of yak butter amount on sensory and embedding rate of yak butter powder

由图 1 可以看出,随着酥油用量的增加,酥油粉感官评分逐渐降低,包埋率先呈现平稳状态,之后逐渐降低。酥油粉感官评分逐渐降低可能与酥油中含

有一定量的丁酸、辛酸、己酸有关,研究发现,丁酸具有持久刺鼻酸败的奶油气味,辛酸具有酸干酪味,己酸具有干酪、油脂腥臭味<sup>[4]</sup>。

### 2.1.2 $\beta$ -环状糊精用量对酥油粉感官、包埋率的影响

$\beta$ -环状糊精的疏水空腔具有生成包络物的能力,可延缓被包埋物氧化,钝化其光敏性、热敏性以及降低被包埋物的挥发性,是良好的包埋壁材。固定酥油用量为38%、酪蛋白酸钠用量为5%、乳化温度为60℃、均质压力为28 MPa、喷雾干燥质量浓度为46 g/100 mL,考察 $\beta$ -环状糊精用量对酥油粉感官、包埋率的影响,结果见图2。

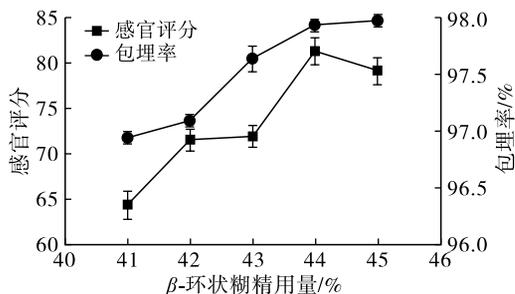


图2  $\beta$ -环状糊精用量对酥油粉感官、包埋率的影响

Fig. 2 Effect of  $\beta$ -cyclodextrin amount on sensory and embedding rate of yak butter powder

由图2可以看出,随着 $\beta$ -环状糊精用量的增加,产品感官评分总体增加,包埋率逐渐增大后呈平稳状态,说明 $\beta$ -环状糊精对酥油包埋起到很好的效果,且可以改善产品感官。

### 2.1.3 酪蛋白酸钠用量对酥油粉感官、包埋率的影响

酪蛋白酸钠分子中分别具有亲水基团和疏水基团,因而具有一定的乳化性,同时其还具有良好的热稳定性,在微胶囊包埋技术领域应用广泛。固定 $\beta$ -环状糊精用量为44%、酥油用量为38%、乳化温度为60℃、均质压力为28 MPa、喷雾干燥质量浓度为46 g/100 mL,考察酪蛋白酸钠用量对酥油粉感官、包埋率的影响,结果见图3。

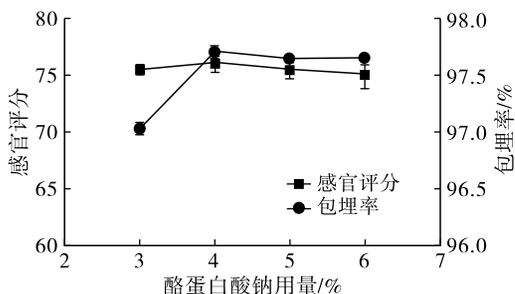


图3 酪蛋白酸钠用量对酥油粉感官、包埋率的影响

Fig. 3 Effect of sodium casein amount on sensory and embedding rate of yak butter powder

由图3可以看出,随着酪蛋白酸钠用量的增加,酥油粉感官评分未发生明显变化,包埋率先增大,在酪蛋白酸钠用量超过4%后呈平稳状态,说明酪蛋白酸钠主要对酥油包埋效果产生影响,且对酥油的包埋起到很好的效果。

### 2.1.4 均质压力对酥油粉感官、包埋率的影响

固定 $\beta$ -环状糊精用量为44%、酥油用量为38%、酪蛋白酸钠用量为4%、乳化温度为60℃、喷雾干燥质量浓度为46 g/100 mL,考察均质压力对酥油粉感官、包埋率的影响,结果见图4。

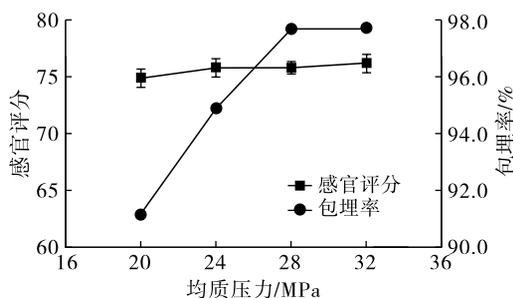


图4 均质压力对酥油粉感官、包埋率的影响

Fig. 4 Effect of homogeneous pressure on sensory and embedding rate of yak butter powder

由图4可以看出,随着均质压力从20 MPa增加到32 MPa,酥油粉感官评分未发生明显变化,包埋率先明显提升,在均质压力超过28 MPa时趋于平稳,说明均质压力对酥油包埋效果产生较大影响。

### 2.1.5 喷雾干燥质量浓度对酥油粉感官、包埋率的影响

固定 $\beta$ -环状糊精用量为44%、酥油用量为38%、酪蛋白酸钠用量为4%、乳化温度为60℃、均质压力为28 MPa,考察喷雾干燥质量浓度对酥油粉感官、包埋率的影响,结果见图5。

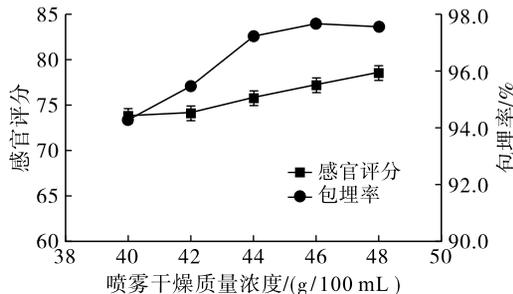


图5 喷雾干燥质量浓度对酥油粉感官、包埋率的影响

Fig. 5 Effect of spray drying mass concentration on sensory and embedding rate of yak butter powder

由图5可以看出,随着喷雾干燥质量浓度的增加,酥油粉感官评分呈现逐渐增加的趋势,包埋率逐渐增大后呈平稳状态。

2.1.6 乳化温度对酥油粉感官、包埋率的影响

固定β-环状糊精用量为44%、酥油用量为38%、酪蛋白酸钠用量为4%、均质压力为28 MPa、喷雾干燥质量浓度为46 g/100 mL,考察乳化温度对酥油粉感官、包埋率的影响,结果见图6。

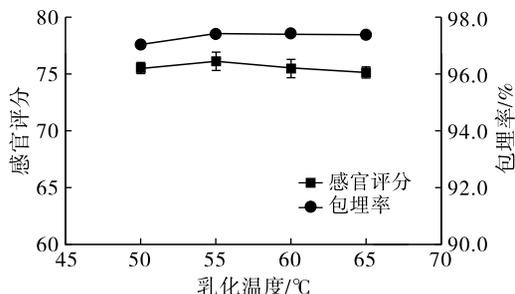


图6 乳化温度对酥油粉感官、包埋率的影响

Fig.6 Effect of emulsification temperature on sensory and embedding rate of yak butter powder

由图6可以看出,随着乳化温度的升高,酥油粉感官评分和包埋率均未发生较大变化,说明乳化温

度对酥油的包埋效果影响不显著。

2.2 酥油粉制备响应面试验

2.2.1 响应面试验设计及分析

根据单因素试验结果,以包埋率为考察指标,控制酪蛋白酸钠用量为4%、乳化温度为60℃,以酥油用量(A)、β-环状糊精用量(B)、均质压力(C)、喷雾干燥质量浓度(D)为因素,利用中心组合设计原理进行四因素三水平响应面试验设计。响应面试验因素和水平编码见表2,响应面试验设计及结果见表3,方差分析见表4。

由表4可以看出,该模型极显著( $p < 0.01$ ),失拟项不显著( $p = 0.2596$ ),说明该模型拟合性好,决定系数( $R^2$ )为0.9929,校正决定系数( $R_{Adj}^2$ )为0.9863,说明该模型可靠,可用于预测酥油包埋关键参数理论值的研究。由F值可知,各因素对酥油包埋效果的影响程度为 $A > D > C > B$ ,即酥油用量 > 喷雾干燥质量浓度 > 均质压力 > β-环状糊精用量。

表2 响应面试验因素和水平

Table 2 Response surface test factor and level

水平	A 酥油用量/%	B β-环状糊精用量/%	C 均质压力/MPa	D 喷雾干燥质量浓度/(g/100 mL)
-2	36	42	26	42
-1	37	43	28	44
0	38	44	30	46
1	39	45	32	48
2	40	46	34	50

表3 响应面试验设计及结果

Table 3 Response surface test design and results

试验号	A	B	C	D	包埋率/%
1	1	1	1	-1	94.0
2	-1	1	1	-1	94.0
3	1	1	1	1	93.6
4	0	0	2	0	95.0
5	0	2	0	0	95.4
6	0	0	0	2	93.9
7	-2	0	0	0	94.8
8	0	0	-2	0	93.8
9	-1	-1	1	-1	94.5
10	0	-2	0	0	95.0
11	-1	-1	-1	1	95.0
12	0	0	0	-2	92.7
13	1	-1	-1	1	92.9
14	0	0	0	0	96.2
15	-1	-1	1	1	95.4
16	-1	1	1	1	95.6
17	1	-1	-1	-1	92.6
18	-1	1	-1	-1	94.3
19	0	0	0	0	96.4

续表3

试验号	A	B	C	D	包埋率/%
20	0	0	0	0	96.5
21	1	1	-1	-1	93.1
22	0	0	0	0	96.3
23	-1	-1	-1	-1	94.5
24	1	1	1	1	94.6
25	2	0	0	0	92.0
26	0	0	0	0	96.5
27	1	-1	1	-1	93.3
28	0	0	0	0	96.3
29	1	1	-1	1	93.0
30	-1	1	-1	1	95.0

表4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	48.03	14	3.43	149.88	<0.0001	**
A	11.76	1	11.76	513.79	<0.0001	**
B	0.28	1	0.28	12.31	0.0032	**
C	2.04	1	2.04	89.20	<0.0001	**
D	2.16	1	2.16	94.37	<0.0001	**

续表 4

来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
AB	0.49	1	0.49	21.41	0.000 3	**
AC	0.64	1	0.64	27.96	<0.000 1	**
AD	0.42	1	0.42	18.46	0.000 6	**
BC	0.06	1	0.06	2.73	0.119 2	
BD	0.04	1	0.04	1.75	0.206 0	
CD	0.25	1	0.25	10.92	0.004 8	**
A <sup>2</sup>	15.00	1	15.00	655.47	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	2.30	1	2.30	100.49	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	6.57	1	6.57	287.23	<0.000 1	**
D <sup>2</sup>	16.03	1	16.03	700.53	<0.000 1	**
残差	0.34	15	0.02			
失拟项	0.27	10	0.03	1.84	0.259 6	
纯误差	0.07	5	0.02			
总和	48.37	29				

注: \* 表示差异显著( $p < 0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $p < 0.01$ )

Note: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

### 2.2.2 响应面试验结果的验证确认

采用 Design - Expert 10.0 软件得到响应面优化试验的最佳包埋条件为酥油用量 38.5%、 $\beta$ -环状糊精用量 45%、均质压力 32 MPa、喷雾干燥质量浓度 47.6 g/100 mL, 此条件下预测产品包埋率为 95.6%。根据实际生产情况, 调整工艺条件为酥油用量 38.5%、 $\beta$ -环状糊精用量 45%、均质压力 32 MPa、喷雾干燥质量浓度 48 g/100 mL, 在此条件下进行验证试验, 得到产品包埋率为 94.6%, 试验结果与预测值拟合度良好, 说明响应面设计稳定可靠。

### 2.3 酥油粉感官评价

以色泽、组织状态、滋气味、冲调状态、口感为考察内容, 按 2.2.2 最佳条件进行 4 次平行试验, 对得到的酥油粉进行感官评价, 感官评分雷达图见图 7。

— 酥油粉1 — 酥油粉2 — 酥油粉3 — 酥油粉4

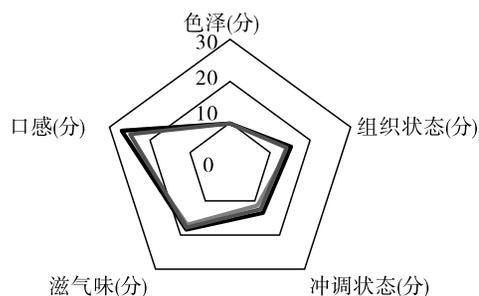


图 7 感官评分雷达图

Fig. 7 Radar chart of sensory scores

由图 7 可以看出: 4 个酥油粉样品间感官评分结果相近, 均值为  $(80.0 \pm 0.8)$ ; 口感对产品感官评分的影响最大  $(25.5 \pm 1.0)$ , 其次是滋气味  $(17.8 \pm$

$0.5)$ 、组织状态  $(14.8 \pm 0.5)$  和冲调状态  $(12.0 \pm 0.80)$ 。

### 2.4 酥油粉理化指标

对 2.3 所得酥油粉理化指标进行测定, 结果见表 5。

表 5 理化指标检测结果

Table 5 Physical and chemical indexes test results

项目	指标/(g/100 g)
水分含量	$2.25 \pm 0.13$
蛋白质含量	$15.10 \pm 0.24$
总脂肪含量	$33.43 \pm 1.23$
过氧化值	$0.22 \pm 0.02$
表面油含量	$1.34 \pm 0.08$

由表 5 可以看出, 产品的水分含量、总脂肪含量、过氧化值以及表面油含量均符合 QB/T 4791—2015《植脂末》的规定(水分含量  $\leq 5.0$  g/100 g, 脂肪含量  $\geq 3.0$  g/100 g, 过氧化值  $\leq 0.25$  g/100 g, 表面油含量  $\leq 5$  g/100 g), 说明该配方及工艺参数所生产的产品满足质量要求。

### 2.5 酥油粉的脂肪酸组成

酥油和酥油粉脂肪酸组成及含量见表 6。

表 6 酥油和酥油粉脂肪酸组成及含量

Table 6 Fatty acid composition and content of yak butter and yak butter powder mg/100 g

脂肪酸	酥油	酥油粉
丁酸 C4:0	$953.50 \pm 1.30$	$950.30 \pm 18.43$
己酸 C6:0	$564.17 \pm 0.15$	$539.23 \pm 13.74$
辛酸 C8:0	$278.10 \pm 0.40$	$257.73 \pm 7.84$
癸酸 C10:0	$528.67 \pm 1.95$	$475.73 \pm 15.44$
十一碳酸 C11:0	$5.40 \pm 0.11$	$4.81 \pm 0.09$
月桂酸 C12:0	$510.00 \pm 0.00$	$456.30 \pm 16.63$
十三碳酸 C13:0	$29.77 \pm 0.31$	$27.59 \pm 0.86$
肉豆蔻酸 C14:0	$2095.47 \pm 9.65$	$1958.96 \pm 76.14$
肉豆蔻油酸 C14:1n5	$108.92 \pm 0.29$	$85.77 \pm 3.26$
十五碳酸 C15:0	$397.07 \pm 1.35$	$408.96 \pm 14.73$
十五碳一烯酸 C15:1n5	$6407.00 \pm 27.00$	$0.00 \pm 0.00$
棕榈酸 C16:0	$228.00 \pm 1.00$	$6807.00 \pm 435.89$
棕榈油酸 C16:1n7	$216.71 \pm 1.29$	$204.10 \pm 7.20$
十七碳酸 C17:0	$64.04 \pm 0.17$	$242.27 \pm 8.15$
十七碳一烯酸 C17:1n7	$4043.74 \pm 19.41$	$61.59 \pm 1.56$
硬脂酸 C18:0	$1903.00 \pm 9.00$	$4903.33 \pm 309.60$
反式油酸 C18:1n9t	$5375.80 \pm 23.55$	$1936.67 \pm 32.65$
油酸 C18:1n9c	$9906.00 \pm 87.00$	$5046.67 \pm 70.81$
反式亚油酸 C18:2n6t	$487.30 \pm 2.10$	$478.33 \pm 17.99$
亚油酸 C18:2n6c	$461.00 \pm 2.00$	$500.40 \pm 20.00$
$\alpha$ -亚麻酸 C18:3n3	$352.47 \pm 2.55$	$382.67 \pm 12.80$

续表 6

脂肪酸	mg/100 g	
	酥油	酥油粉
$\gamma$ -亚麻酸 C18:3n6	3.98 ± 0.09	15.21 ± 0.38
花生酸 C20:0	110.37 ± 0.76	121.00 ± 5.99
二十碳一烯酸 C20:1	11.33 ± 0.04	18.96 ± 1.05
二十碳二烯酸 C20:2	8.48 ± 0.04	11.37 ± 0.56
二十碳三烯酸 C20:3n3	8.33 ± 0.58	8.12 ± 0.22
二十碳三烯酸 C20:3n6	9.03 ± 0.08	12.67 ± 0.80
二十碳四烯酸 C20:4n6 (ARA)	23.46 ± 0.09	78.64 ± 2.28
二十碳五烯酸 C20:5n3 (EPA)	20.75 ± 0.30	26.41 ± 1.59
二十一碳酸 C21:0	334.92 ± 1.83	314.00 ± 6.19
芥酸 C22:1n9	6.35 ± 0.01	10.42 ± 0.33
二十二碳酸 C22:0	74.10 ± 0.88	79.60 ± 3.22
二十二碳二烯酸 C22:2n6	10.78 ± 0.68	9.80 ± 0.54
二十二碳六烯酸 C22:6n3 (DHA)	5.02 ± 0.06	27.66 ± 4.99
二十三碳酸 C23:0	30.57 ± 0.24	34.81 ± 1.75
二十四碳酸 C24:0	34.74 ± 0.04	36.42 ± 1.38
二十四碳一烯酸 C24:1n9	6.13 ± 1.14	6.74 ± 0.20
饱和脂肪酸	8 141.89	17 618.04
不饱和脂肪酸	27 472.58	8 922.20
单不饱和脂肪酸	26 081.98	7 370.92
多不饱和脂肪酸	1 390.60	1 551.28
总量	35 614.47	26 540.24

由表 6 可以看出,酥油中不饱和脂肪酸含量较高,为 27 472.58 mg/100 g,其中:单不饱和脂肪酸含量为 26 081.98 mg/100 g,占脂肪酸总量的 73.23%,主要为油酸、十五碳一烯酸、反式油酸、十七碳一烯酸等;多不饱和脂肪酸含量为 1 390.60 mg/100 g,占脂肪酸总量的 3.90%,其中 EPA、DHA 含量分别为 20.75、5.02 mg/100 g,EPA 和 DHA 可降低血浆甘油三酯,提高高密度脂蛋白水平,从而降低心血管死亡及非致死性心肌梗死的风险,其代谢产物可发挥抗炎作用<sup>[11-12]</sup>。酥油中饱和脂肪酸含量为 8 141.89 mg/100 g,占脂肪酸总量的 22.86%,其中肉豆蔻酸、硬脂酸含量较高,其次是丁酸、己酸、癸酸、月桂酸、十五碳酸、二十一碳酸、辛酸和棕榈酸等。

由表 6 还可以看出:酥油粉中饱和脂肪酸含量为 17 618.04 mg/100 g,占脂肪酸总量的 66.38%,与酥油中饱和脂肪酸占比(22.86%)相比明显增加,其中短链脂肪酸(丁酸、己酸)总含量为 1 489.53 mg/100 g,占脂肪酸总量的 5.61%,与酥油中短链脂肪酸占比(4.26%)相比增加;酥油粉中单不饱和

脂肪酸含量为 7 370.92 mg/100 g,占脂肪酸总量的 27.77%,与酥油中单不饱和脂肪酸占比(73.23%)相比明显降低;酥油粉中多不饱和脂肪酸含量为 1 551.28 mg/100 g,占脂肪酸总量的 5.81%,与酥油中多不饱和脂肪酸占比(3.88%)相比有所增加。研究发现,短链脂肪酸可通过增加心脏供能、减轻高血压、减轻炎症反应等直接改善心脏功能,也可以通过调节糖脂代谢、恢复肠道屏障等方式间接保护心脏功能,降低心血管疾病发生风险<sup>[13]</sup>,但饱和脂肪酸摄入量过多,尤其是月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸大量摄入后,则会导致血胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇升高,进而引发动脉管腔狭窄,形成动脉粥样硬化,增加患冠心病的风险<sup>[14]</sup>。因此,饱和脂肪酸虽对机体有众多积极作用,但摄入过量仍存在健康风险。单不饱和脂肪酸可以通过对血脂、内皮、凝血和纤溶系统、3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶及低密度脂蛋白氧化敏感性的调节,对血脂产生正向调节作用,从而降低心血管疾病的发生率<sup>[15]</sup>,但过量摄入单不饱和脂肪酸可能导致腹泻和二羧酸尿症<sup>[16]</sup>。因此,单不饱和脂肪酸摄入量过量也存在健康风险。 $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸,如  $\alpha$ -亚麻酸、EPA、DHA, $\omega$ -6 多不饱和脂肪酸,如亚油酸、 $\gamma$ -亚麻酸、ARA,在动物体内发挥着重要的生理作用,如具有抗炎、抗氧化和免疫调节作用<sup>[17]</sup>,可减少促炎因子的生成<sup>[18]</sup>,参与细胞基因表达的调控,减少基因表达错误的发生,抑制致癌因子的活性<sup>[19]</sup>。同时, $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸还对预防其他慢性或代谢性疾病,如糖尿病、肥胖、骨质疏松、神经退行性变<sup>[20]</sup>和骨折等具有很好的效果<sup>[21-22]</sup>。 $\omega$ -3/ $\omega$ -6 多不饱和脂肪酸的摄入量须保持一定比例,以满足机体需要,但机体内堆积过多的多不饱和脂肪酸,会使维生素 E 水平下降<sup>[23]</sup>。本研究发现,脂肪酶酶解可调整酥油脂肪酸组成及含量,使酥油粉富含更多的多不饱和脂肪酸。

### 3 结 论

酥油中单不饱和脂肪酸含量较高,占脂肪酸总量的 73.23%,其次是饱和脂肪酸,占脂肪酸总量的 22.86%,还含有 3.90% 的多不饱和脂肪酸,如 DHA、EPA、ARA。将酥油通过脂肪酶酶解,并经微胶囊包埋、喷雾干燥制备为酥油粉,经单因素试验和响应面试验优化得到酥油粉最佳制备工艺为酥油用量 38.5%、 $\beta$ -环状糊精用量 45%、酪蛋白酸钠用量 4%、乳化温度 60℃、均质压力 32 MPa、喷雾干燥质量浓度 48 g/100 mL,在此条件下,产品包埋率为 94.6%,制备的酥油粉水分含量、总脂肪含量、过氧

化值以及表面油含量均符合 QB/T 4791—2015《植脂末》的规定,其短链饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸相对含量增加,单不饱和脂肪酸与酶解前相比,相对含量有所降低。采用脂肪酶酶解、微胶囊包埋技术可实现对酥油脂肪酸组分调整、改善酥油风味,延缓酥油脂肪酸氧化的目的,符合大健康产业需求。

#### 参考文献:

- [1] LIU H N, REN F Z, JIANG L, et al. Short communication: Fatty acid profile of yak milk from the Qinghai - Tibetan Plateau in different seasons and for different parities[J]. J Dairy Sci, 2011, 94(4): 1724 - 1731.
- [2] AGYARE A N, LIANG Q. Nutrition of yak milk fat: Focusing on milk fat globule membrane and fatty acids[J/OL]. J Funct Foods, 2021, 83: 104404 [2023 - 05 - 16]. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104404>.
- [3] 袁锦莹, 孙万成, 罗毅皓, 等. 牦牛酥油支链脂肪酸对人乳腺癌细胞抑制的转录组学分析[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 195 - 200.
- [4] 谢司伟, 刘春爱, 孙术国, 等. 西藏不同海拔牦牛酥油的营养、风味及功能特性比较[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 19 - 23, 33.
- [5] 雷有娟, 孙万成, 罗毅皓, 等. 不同溶剂提取牦牛酥油中的磷脂及其脂质组学研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 110 - 116.
- [6] 毕成名, 徐丽梅, 祁百巍, 等. 牦牛酥油微胶囊的制备及其特性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 226 - 235.
- [7] 侯园园. 酶处理对天然乳脂组成和风味的影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2008.
- [8] 张晓梅, 艾娜丝, 王静, 等. 乳脂肪及其酶解风味改善研究进展[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 128 - 135.
- [9] GÓMEZ - MASCARAQUE L G, HERNÁNDEZ - ROJAS M, TARANCÓN P, et al. Impact of microencapsulation within electrosprayed proteins on the formulation of green tea extract - enriched biscuits [J]. LWT - Food Sci Technol, 2017, 81: 77 - 86.
- [10] 林荣芳, 徐梦豪, 高丽伟, 等. 响应面法优化 DHA 藻油微胶囊工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(12): 114 - 123.
- [11] 喻峰, 熊华, 吕培蕾. 西藏牦牛酥油脂肪酸成分分析及功能特性评价[J]. 中国油脂, 2006, 31(11): 35 - 38.
- [12] 刘秋雷, 杨燎, 刘硕, 等. 多不饱和脂肪酸代谢与动脉粥样硬化的关系[J/OL]. 中国动脉硬化杂志, 2023: 1 - 17 [2023 - 05 - 16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1262.R.20230310.0851.002.html>.
- [13] 朱苏红, 林丽文, 王友, 等. 短链脂肪酸在心血管疾病中的作用[J]. 中国新药与临床杂志, 2022, 41(11): 651 - 655.
- [14] LEGRAND P, RIOUX V. Specific roles of saturated fatty acids: Beyond epidemiological data[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2015, 117(10): 1489 - 1499.
- [15] 王娜. 单不饱和脂肪酸对心血管疾病的作用机制[J]. 中国实用医药, 2010, 5(23): 256 - 257.
- [16] Scientific opinion on the essential composition of infant and follow - on formulae [J/OL]. EFSA J, 2014, 12(7): 3760 [2023 - 05 - 16]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3760>.
- [17] MÉNDEZ L, MEDINA I. Polyphenols and fish oils for improving metabolic health: A revision of the recent evidence for their combined nutraceutical effects[J/OL]. Molecules, 2021, 26(9): 2438 [2023 - 05 - 16]. <https://doi.org/10.3390/molecules26092438>.
- [18] FEDULLO A L, SCHIATTARELLA A, MORLANDO M, et al. Mediterranean diet for the prevention of gestational diabetes in the covid - 19 era: Implications of II - 6 in diabetes[J/OL]. Int J Mol Sci, 2021, 22(3): 1213 [2023 - 05 - 16]. <https://doi.org/10.3390/ijms22031213>.
- [19] 朱升龙.  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸对两种抗癌药物在乳腺癌细胞中抗肿瘤效果的增强作用及其机制研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [20] BAZINET R P, LAYÉ S. Polyunsaturated fatty acids and their metabolites in brain function and disease[J]. Nat Rev Neurosci, 2014, 15(12): 771 - 785.
- [21] INNIS S M. Dietary  $\omega$  3 fatty acids and the developing brain[J]. Brain Res, 2008, 1237: 35 - 43.
- [22] KANG J X, LIU A. The role of the tissue  $\omega$  - 6/ $\omega$  - 3 fatty acid ratio in regulating tumor angiogenesis [J]. Cancer Metastasis Rev, 2013, 32(1/2): 201 - 210.
- [23] 燕志, 朱江煜, 魏继燕, 等.  $n$ -3/ $n$ -6 多不饱和脂肪酸的生理功能与膳食平衡研究[J]. 江苏调味副食品, 2022(3): 1 - 3.