凝胶油替代脂肪制备牛肉饼的配方优化

李明华，高艳蕾，宋艳艳，张丽，余群力，韩玲，郭兆斌
（甘肃农业大学食品科学与工程学院，甘肃兰州 730070）

摘要：为优化获得一种凝胶油替代脂肪制备牛肉饼的配方，本试验以不同浓度的蜂蜡（2.5%，5%，7.5%，10%，12.5%）制备菜籽基凝胶油替代脂肪生产牛肉饼。采用模糊数学评判法，通过单因素试验分析凝胶油浓度、复合磷酸盐添加量、卡拉胶胶添加量以及水分添加量四个因素对牛肉饼感官评价的影响，并采用正交实验和模糊数学评价法，对牛肉饼的最佳配方进行优化。结果表明，凝胶油浓度为 10%，复合磷酸盐添加量为 0.3%，卡拉胶添加量为 0.3%，水分添加量为 20%，在此条件下凝胶油替代脂肪制备的牛肉饼综合评定分值高达 87.60，其组织致密、滋味浓郁、弹性较好。借助模糊数学法和正交试验构建的综合评价体系，优化获得的凝胶油替代脂肪的牛肉饼的最佳配方，可为新型的肉制品加工工艺提供理论依据。

关键词：模糊数学评价法；凝胶油；脂肪替代；牛肉饼
文章篇号：1673-9078(2020)05-252-260 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.5.034

Formulation Optimization of Beef Pie Using Gel Oil Instead of Fat

LI Ming-hua, GAO Yan-lei, SONG Yan-yan, ZHANG Li, YU Qun-li, HAN Ling, GUO Zhao-bin
(College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to optimize the formulation of a gel oil instead of fat, the rapeseed based gel oil with different concentrations of beeswax (2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%) instead of fat was prepared to produce beef cake. The influence of four factors on the sensory evaluation of beef cake was analyzed by single factor experiment, including gel oil concentration, compound phosphate content, carrageenan gum content and water content. The best formula of beef cake was optimized by orthogonal experiment and fuzzy mathematics evaluation method. The results showed that the gel oil concentration was 10%, the composite phosphate content was 0.3%, the carrageenan content was 0.3%, and the water content was 20%. Under these conditions, the comprehensive evaluation score of the gel cake instead of fat was as high as 87.60. Based on the comprehensive evaluation system constructed by fuzzy mathematics and orthogonal experiment, the best formula of gel oil instead of fat was optimized, which can provide a theoretical basis for the processing of new meat products.

Key words: fuzzy mathematics evaluation method; gel oil; fat replacement; beef patties

引文格式：

李明华,高艳蕾,宋艳艳,等.凝胶油替代脂肪制备牛肉饼的配方优化[J].现代食品科技,2020,36(5):252-260

LI Ming-hua, GAO Yan-lei, SONG Yan-yan, et al. Formulation optimization of beef pie using gel oil instead of fat [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 252-260

肉饼做为一种速食产品越来越受到人们的青睐，主要以碎肉和脂肪为原料，其中脂肪含量较高，约为25%~30%[1]。动物脂肪中饱和脂肪酸含量高，约为23%，而过量的饱和脂肪酸摄入会对人体健康产生不利的影响，如肥胖，癌症，高血脂和冠心病[2]，世界卫生组织建议将膳食脂肪含量限制在每日总能量摄入量的 15%~30%之间[3]。为满足食品工业中低饱和脂肪酸的健康需求，寻求动物脂肪的替代物成为近年来研究的热点之一。已有研究采用植物油代替动物脂肪来减少饱和脂肪酸的摄入，但是由于植物油中含有较多的不饱和脂肪酸，在室温下会影响油脂结构的形成，导致植物油直接替代动物脂肪对食品质量有不利影响[4-6]。Marquez 等[7]发现采用花生油替代牛脂肪生产的法兰克福香肠的乳化稳定性和感官评价得分降低。Youssef 等[8]用菜籽油替代 25%的牛脂肪制备肉糜类产品，其制品硬度较高。Dzudie 等[9]采用含有 20%花

收稿日期：2019-11-30
基金项目：国家自然基金地区基金项目(31660469)；霍英东教育基金项目(151106)；中国国家现代农业(肉牛牦牛)产业技术体系资助项目(CARS-37)
作者简介：李明华（1995-），女，硕士研究生，研究方向：畜产品加工学
通讯作者：张丽（1979-），女，博士，教授，研究方向：肉品加工与质量安全控制

生和玉米油代替脂肪制备牛肉饼，发现含有植物油肉饼的持水率降低，蒸煮损失增加，质地变软。因此，采用植物油替代脂肪会导致肉类产品硬度，黏性等食用品质下降。目前有学者采用直接法、间接法和结构化两项系统法等来固化植物油以形成稳定的结构并用于肉品加工，其中直接法是采用凝胶因子（脂类、磷脂酰甘油和胶体二氧化硅等）直接分散到液体油中，形成凝胶油[10,11]。凝胶油是一种三维网状结构，阻止了植物油流动等特性，从而使整个体系凝胶化[12,13]。通过在植物油中添加凝胶因子形成的凝胶油具有如动物脂肪般的机械强度和可塑性，可有效抑制油脂迁移，替代动物脂肪用于肉类产品的生产[14,15]。目前在食品工业中常用的凝胶因子包括脂基和乙基纤维素等，其中，蜡、脂肪酸和单甘油酯等脂基凝胶剂在肉品加工中已有研究[10]。Zetzl 等[16]和 Barbut[17]等利用乙基纤维素和菜籽油制备凝胶油，并部分代替脂肪生产法兰克福香肠，发现香肠的硬度、咀嚼性和黏性与含牛脂肪香肠无显著差异。Maryam[18]采用芝麻油和蜂蜡制备凝胶油部分替代牛脂肪生产的牛肉汉堡烹饪损失和硬度均显著降低。Wolfer[19]用菜籽油和蜂蜡替代牛脂肪制备的法兰克福香肠与传统工艺制备的产品感官评价结果无差异。

模糊数学是用精确的数学方法来处理无法用数字精确描述的模糊概念或事物，模糊数学感官评价法综合考虑了所有的评定因素，可以克服传统评价方法的弊端，使得评判结果较为合理[20]。因此，本试验采用正交实验和模糊数学法来优化获得一种蜂蜡制备菜籽基凝胶油替代脂肪生产牛肉饼的配方，进而探索凝胶油替代脂肪的潜力，从而寻求健康营养的肉类产品。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

1.1.1 试验材料

菜籽油：上海益海嘉里有限公司；蜂蜡，深圳市思美泉生物科技有限公司；牛肉，购自当地市场，-18 ℃贮藏，备用。

1.1.2 仪器与设备

HX-1002T 分析天平，慈溪市天东衡器厂；JJ-60W 磁力搅拌器，金坛区西城新瑞仪器厂；HHS-1-1 水浴器具，上海博讯实业有限公司医疗设备厂；MM-12A 绞肉机，诸城和义机械有限公司。

1.2 加工工艺

1.2.1 工艺流程

碎牛肉、盐、复合磷酸盐、凝胶油

↓

原料预处理→搅碎→腌制→斩拌→冷冻成型→包装→熟制

↑

洋葱、淀粉、卡拉胶、黄原胶、水

1.2.2 工艺操作要点

（1）原料的预处理。

牛肉：原料洗去表面血迹和污物，除去结缔组织、筋膜和脂肪，于-18 ℃冰箱中冻藏备用；凝胶油：用蜂蜡分别制备浓度为 2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%凝胶油，于 4 ℃冷藏备用。

（2）绞碎。

肉块经筛板漏眼孔径为 2~3 mm 的绞肉机绞碎，肉料绞制后于-18 ℃的环境中备用。

（3）腌制。

将碎牛肉、食盐、凝胶油和复合磷酸盐搅拌均匀，置于食品托盘密封静置 2 h。

（4）斩拌。

将腌制的肉糜、胡椒粉、淀粉、洋葱末、卡拉胶和黄原胶放入斩拌机中按顺时针方向斩拌，进行斩拌，边斩拌边加冰水至胶状。斩拌 5 min，将其充分混匀。

（5）冷冻成型。

混合好的原料用模具成型，每个肉饼的质量约为 80 g，直径 8 cm，厚度 1.5 cm 并于-18 ℃冷冻 2 h。

（6）包装。

对肉饼的重量、形状、色泽、味道等指标进行检验，检验合格后，对合格产品真空包装。整个工艺操作中，严防二次污染。

（7）熟制。

将肉饼于 110 ℃煎炸 5 min 至两面金黄，捞出，冷却。

1.3 试验方案设计

1.3.1 单因素试验

参照 Maryam[15]等的配方牛肉饼单因素试验设计为凝胶油浓度 2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%，复合复合磷酸盐添加量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%，卡拉胶添加量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%，水分添加量为 10%、15%、20%、25%、30%。当单因素按变量取值时，其它固定量取值分别取单因素优化结果（添加辅料的百分比均以牛肉的总量计算）。将混合好的原料用模具成型，并于-18 ℃冷冻 2 h 成型，后将肉饼于 110 ℃煎炸 5 min 于两面金黄，捞出，冷却并进行感官评价。

1.3.2 正交试验设计

根据单因素实验的结果，采用四因素三水平的正交试验进一步试验。试验因素与水平设计见表 1。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal test factor level table

水平	因素			
	A(凝胶油浓度)/%	B(复合磷酸盐)/%	C(卡拉胶)/%	D(水分)/%
a	5	0.2	0.2	15
b	7.5	0.3	0.3	20
c	10	0.4	0.4	25

1.3.3 感官评价方法

表 2 肉饼感官评价表

Table 2 Meatball sensory evaluation form

评价项目	评价指标	分值
色泽	表面金黄，色泽分布均匀	优
	表面金黄，色泽分布较均匀	良
	表面淡黄或者棕黄，色泽分布不均匀	中
	表面焦黑，色泽分布不均匀	差
滋味	具有明显的煎制肉饼风味，香气浓郁	优
	具有较明显的煎制肉饼风味，香气较淡	良
	煎制肉饼风味不明显，香气淡	中
	无煎制肉饼风味，混合其他杂味	差
口感	外酥里嫩，爽口，细嫩，汁多	优
	表皮较酥，较爽口，肉汁较少	良
	表皮无酥脆感，肉汁少	中
	里外都较湿软，不爽口，基本无肉汁	差
组织形态	表面有脆性，切面的组织细密，弹性好	优
	表面脆性较好，切面的组织较细密，弹性较好	良
	表面脆性较差，切面的组织较稀松，弹性较差	中
	表面无脆性，软烂，弹性差	差

每次处理随机选择样品，每个样品用三位数代码随机编号并置于容器中由专门小组成员以随机顺序评估。选择 10 名（5 男 5 女）本专业成员参加感官评定，不得相互沟通交流，每次评定完成后用清水漱口再对下一批产品进行感官评价。肉饼的感官评价如表 2。

1.4 感官评价数学模型的建立

评价因素集 X 的确定：评价因素集 X 即因肉饼评价指标构成的因素集合。X=（X_1，X_2，X_3，X_4）。其中 X_1，X_2，X_3，X_4 分别代表试验过程中评价肉饼时需要的评价指标。即 X=（色泽，滋味，口感，组织形态）。

得分集 U 的确定：得分集 U=（U_1，U_2，U_3，U_4），其中 U_1~U_4 分别代表优、良、中、差 4 个等级，对应 90，80，70，60，4 个分值，即 U=（90，80，70，60）。

表 3 肉饼的模糊数学评价权重集

Table 3 Fuzzy mathematics evaluation weight set of meatloaf

编号	色泽	滋味	口感	组织形态
1	2	3	3	2
2	1	3	3	3
3	3	1	4	2
4	3	2	3	2
5	1	6	1	2
6	1	4	3	2
7	3	2	2	3
8	2	3	3	2
9	2	3	4	1
10	4	2	1	3
总分	22	29	27	22

模糊评价权重集 K 的确定：采用用户调查法[21]确定对应的指标权重 K 其中 K_1、K_2、K_3、K_4 分别代表色泽，滋味，口感，组织形态。对肉饼的模糊评价权重集指标设定见表 3。结果为色泽（0.22）、滋味（0.29）、口感（0.27）、组织形态（0.22），即 K=（K_1、K_2、K_3、K_4）＝（0.22，0.29，0.27，0.22）。

1.5 统计分析

试验数据采用 Word 2010 软件及 Design-expert 8.0.6 进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 单因素结果分析

2.1.1 凝胶油浓度对肉饼感官评价的影响

表 4 凝胶油浓度/复合磷酸盐添加量对肉饼品质的影响

Table 4 Effect of gel oil concentration/phosphate addition on meat quality

凝胶油浓度/%	X	v				复合磷酸盐添加量/%	X	v			
		优	良	中	差			优	良	中	差
2.5	色泽	1	1	3	5	0.1	色泽	0	1	5	4
	滋味	1	1	4	4		滋味	0	1	3	6
	口感	0	2	1	7		口感	0	2	4	4
	组织形态	0	1	3	6		组织形态	1	4	3	2
5	色泽	1	3	3	3	0.2	色泽	1	3	3	3
	滋味	3	3	2	2		滋味	3	3	4	0
	口感	2	4	2	2		口感	2	4	2	2
	组织形态	2	4	3	1		组织形态	2	4	3	0
7.5	色泽	2	5	2	1	0.3	色泽	2	5	3	0
	滋味	4	3	1	2		滋味	5	3	2	0
	口感	4	3	2	1		口感	2	7	1	0
	组织形态	6	1	1	2		组织形态	3	4	3	0
10	色泽	5	3	1	1	0.4	色泽	2	3	4	1
	滋味	4	4	2	0		滋味	2	3	3	2
	口感	7	1	2	0		口感	3	2	3	2
	组织形态	8	2	0	0		组织形态	2	3	3	2
12.5	色泽	2	5	3	0	0.5	色泽	0	2	5	3
	滋味	5	3	2	0		滋味	2	2	2	4
	口感	2	7	1	0		口感	1	2	3	4
	组织形态	3	4	3	0		组织形态	2	3	2	3

$$A_1=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5\\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4\\ 0 & 0.2 & 0.1 & 0.7\\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6\end{vmatrix}$$

$$A_2=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3\\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2\\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2\\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1\end{vmatrix}$$

$$A_3=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1\\ 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.2\\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1\\ 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$A_4=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1\\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0\\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0\\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0\end{vmatrix}$$

$$A_5=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.2 & 0.5 & 0.3 & 0\\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0\\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0\end{vmatrix}$$

评定结果是指标权重集 K 与模糊矩阵 A 的合成，即 $Y=KA$。凝胶油浓度为 2.5%时制备的肉饼

$$Y_1=KA_1=(0.22，0.29，0.27，0.22)\begin{vmatrix}0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5\\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4\\ 0 & 0.2 & 0.1 & 0.7\\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6\end{vmatrix}$$

其中：A_{11}=0.22×0.1+0.29×0.1+0.27×0+0.22×0=0.051，

A_{12}=0.22×0.1+0.29×0.1+0.27×0.2+0.22×0.1=0.127，

A_{13}=0.22×0.3+0.29×0.4+0.27×0.1+0.22×0.3=0.257，

A_{14}=0.22×0.5+0.29×0.4+0.27×0.7+0.22×0.6=0.547，

A_{15}=0.22×0.5+0.29×0.3+0.27×0.4+0.22×0.3=0.371。

因此 Y_1=（A_{11}，A_{12}，A_{13}，A_{14}）=（0.051，0.127，0.257，0.547），即 U=65.56。

同理凝胶油浓度为 5%的肉饼的 Y_2=（0.207，0.349，0.244，0.20），U=75.63；凝胶油浓度为 7.5%的肉饼的 Y_3=（0.4，0.322，0.149，0.151），U=81.25；凝胶油浓度为 10%的肉饼的 Y_4=（0.591，0.253，0.134，0.022），U=84.13。凝胶油浓度为 12.5%的肉饼的 Y_5=（0.309，0.474，0.217，0），U=80.92。

凝胶油因其具有半固态油脂黏弹性、低反式脂肪酸和饱和脂肪酸等优点可替代脂肪用于肉品加工[10-12]。凝胶油浓度为 10%时，牛肉饼的模糊感官评分最高。凝胶油浓度低于 10%时，凝胶油呈现液态和黏稠态[22]，其硬度低，导致制备的牛肉饼松软，成型度较差。凝胶油浓度增高，感官评分降低，其原因在于凝胶油浓度高时，蜂蜡添加量高，在煎炸过程中蜂蜡的气味会影响肉饼的风味。

2.1.2 复合磷酸盐添加量对肉饼感官评价的影响

$$B_1=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0 & 0.1 & 0.5 & 0.4\\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6\\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4\\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$B_2=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3\\ 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0\\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2\\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0\end{vmatrix}$$

$$B_3=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.2 & 0.5 & 0.3 & 0\\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0\\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0\end{vmatrix}$$

$$B_4=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$B_5=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0 & 0.2 & 0.5 & 0.3\\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.4\\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4\\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.3\end{vmatrix}$$

评定结果是指标权重集 K 与模糊矩阵 B 的合成，即 Y=KB。复合磷酸盐添加量为 0.1%的肉饼

$$Y_1=KB_1=(0.22，0.29，0.27，0.22)\begin{vmatrix}0 & 0.1 & 0.5 & 0.4\\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6\\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4\\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2\end{vmatrix}$$

其中：B_{11}=0.22×0+0.29×0+0.27×0+0.22×0.1=0.022，

B_{12}=0.22×0.1+0.29×0.1+0.27×0.2+0.22×0.4=0.193，

B_{13}=0.22×0.5+0.29×0.3+0.27×0.4+0.22×0.3=0.371，

B_{14}=0.22×0.4+0.29×0.6+0.27×0.4+0.22×0.2=0.370。

因此 Y_1=（B_{11}，B_{12}，B_{13}，B_{14}）=（0.022，0.193，0.371，0.370），即 U=65.59。

同理复合磷酸盐添加量为 0.2%的肉饼的 Y_2=（0.207，0.365，0.302，0.120），U=76.17。

复合磷酸盐添加量为 0.3%的肉饼的 Y_3=（0.309，0.474，0.217，0），U=80.92。

复合磷酸盐添加量为 0.4%的肉饼的 Y_4=（0.200，0.273，0.322，0.178），U=73.06。

复合磷酸盐添加量为 0.5%的肉饼的 Y_5=（0.129，0.222，0.293，0.356），U=71.24。

复合磷酸盐由于多种复合磷酸盐的协同作用，能起到保水，保油，护色，稳定和调味的作用，更能使产品结构稳定，富有弹性[23]。复合磷酸盐的添加使肉饼的品质得到改善且在添加量为 0.3%时，其感官评分最佳。而当复合磷酸盐的浓度超过 0.3%时，会因磷酸盐固有的气味和涩味而影响肉制品的风味，使得肉制品的口感粗糙[24]。故选取浓度为 0.3%的复合磷酸盐适宜。

2.1.3 卡拉胶添加量对肉饼感官评价的影响

$$C_1=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4\\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.6\\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4\\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3\end{vmatrix}$$

$$C_2=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3\\ 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0\\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2\\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0\end{vmatrix}$$

$$C_3=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.2\\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1\\ 0.6 & 0.1 & 0.3 & 0\end{vmatrix}$$

$$C_4=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$C_5=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0 & 0.2 & 0.5 & 0.3\\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.4\\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4\\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3\end{vmatrix}$$

评定结果是指标权重集 K 与模糊矩阵 C 的合成，即 $Y=KC$。卡拉胶添加量为 0.1%肉饼

$$Y_1=KC_1=(0.22,\ 0.29,\ 0.27,\ 0.22)\begin{vmatrix}0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4\\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.6\\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4\\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3\end{vmatrix}$$

其中：C_{11}=0.22×0.1+0.29×0.1+0.27×0+0.22×0=0.051，

C_{12}=0.22×0.1+0.29×0.1+0.27×0.2+0.22×0.3=0.173，

C_{13}=0.22×0.4+0.29×0.2+0.27×0.4+0.22×0.4=0.342，

C_{14}=0.22×0.4+0.29×0.6+0.27×0.4+0.22×0.3=0.436。

因此 Y_1=（C_{11}，C_{12}，C_{13}，C_{14}）=（0.051，0.173，0.342，0.436），即 U=68.53。

同理卡拉胶添加量为 0.2%的肉饼的 Y_2=（0.229，0.349，0.302，0.120），U=76.87。

卡拉胶添加量为 0.3%的肉饼的 Y_3=(0.446，0.310，0.129，0.071），U=78.23。

卡拉胶添加量为 0.4%的肉饼的 Y_4=(0.227，0.273，0.322，0.178），U=75.49。

卡拉胶添加量为 0.5%的肉饼的 Y_5=(0.107，0.200，0.337，0.356），U=70.5。

由结果分析可知，牛肉饼的感官评分随卡拉胶添加量呈现先上升后下降的趋势。当卡拉胶添加量为 0.3%时，牛肉饼的感官评分值最高，口感最佳，而随着卡拉胶添加量的增加，会影响牛肉饼色泽[25]，导致感官评分降低。因此，卡拉胶的最适添加量为 0.3%。

表 5 卡拉胶/水分添加量对肉饼感官评价的影响

Table 5 Effect of carrageenan/moisture addition on sensory evaluation of meatloaf

卡拉胶添加量/%	X	v				水分添加量/%	X	v			
		优	良	中	差			优	良	中	差
0.1	色泽	1	1	4	4	10	色泽	0	5	3	2
	滋味	1	1	2	6		滋味	1	4	4	1
	口感	0	2	4	4		口感	1	4	1	4
	组织形态	0	3	4	3		组织形态	0	3	5	2
0.2	色泽	1	3	3	3	15	色泽	0	3	5	2
	滋味	3	3	4	0		滋味	1	3	4	2
	口感	2	4	2	2		口感	2	3	3	2
	组织形态	3	4	3	0		组织形态	1	5	3	1
0.3	色泽	4	3	1	2	20	色泽	0	5	4	1
	滋味	5	3	2	0		滋味	2	4	4	0
	口感	3	5	1	1		口感	2	4	3	1
	组织形态	6	1	3	0		组织形态	6	1	3	0
0.4	色泽	2	3	4	1	25	色泽	2	3	4	1
	滋味	2	3	3	2		滋味	2	3	3	2
	口感	3	2	3	2		口感	2	2	4	2
	组织形态	2	3	3	2		组织形态	2	3	3	2
0.5	色泽	0	2	5	3	30	色泽	1	2	5	2
	滋味	2	2	2	4		滋味	1	2	4	3
	口感	1	2	3	4		口感	0	2	3	5
	组织形态	1	2	4	3		组织形态	0	2	2	6

2.1.4 水添加量对肉饼感官评价的影响

$$D_1=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0 & 0.5 & 0.3 & 0.2\\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1\\ 0.1 & 0.4 & 0.1 & 0.4\\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$D_2=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0 & 0.3 & 0.5 & 0.2\\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1\end{vmatrix}$$

$$D_3=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0 & 0.5 & 0.4 & 0.1\\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0\\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1\\ 0.6 & 0.1 & 0.3 & 0\end{vmatrix}$$

$$D_4=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$D_5=(a_{ij})_{5\times5}=\begin{vmatrix}0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2\\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3\\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.5\\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6\end{vmatrix}$$

评定结果是指标权重集 K 与模糊矩阵 A 的合成，即 $Y=KD$。水分添加量为 10%的肉饼

$$Y_1=KD_1=(0.22，0.29，0.27，0.22)\begin{vmatrix}0 & 0.5 & 0.3 & 0.2\\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1\\ 0.1 & 0.4 & 0.1 & 0.4\\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2\end{vmatrix}$$

其中：$D_{11}=0.22\times0+0.29\times0.1+0.27\times0.1+0.22\times0=0.056$;

$D_{12}=0.22\times0.5+0.29\times0.4+0.27\times0.4+0.22\times0.3=0.400$;

$D_{13}=0.22\times0.3+0.29\times0.4+0.27\times0.1+0.22\times0.5=0.319$;

$D_{14}=0.22\times0+0.29\times0.3+0.27\times0.5+0.22\times0.2=0.266$。

因此 $Y_1=(D_{11}，D_{12}，D_{13}，D_{14})=(0.056，0.400，0.319，0.266)$，即 $U=61.4$。

同理水分添加量为 15%的肉饼的 $Y_2=(0.105，0.344，0.373，0.178)$，$U=73.76$。

水分添加量为 20%的肉饼的 $Y_3=(0.244，0.356，0.351，0.049)$，$U=77.95$。

水分添加量为 25%的肉饼的 $Y_4=(0.200，0.244，0.349，0.178)$，$U=72.63$。

水分添加量为 30%的肉饼的 $Y_5=(0.051，0.200，0.324，0.398)$，U=67.15。

添加水能有效改变蛋白凝胶含水量，当水分添加量为 20%时，牛肉饼的感官评价结果最高。但随着加水量的增加，肉饼加水量超过它的持水能力，被盐溶解出的肉蛋白会被稀释冲淡粘合强度会大幅下降[26]。因此水的最适添加量为 20%。

2.2 正交试验结果分析

2.2.1 正交试验

根据单因素实验的结果，采用四因素三水平的正交试验进一步试验。运用模糊数学感官评价方法，对正交试验的 9 组肉饼进行感官评价，评价结果见表，同时得到 9 个模糊矩阵（R_1、R_2、R_3、R_4、R_5、R_6、R_7、R_8、R_9）。

表 6 正交试验模糊感官评价结果分析

Table 6 Analysis of fuzzy sensory evaluation results in orthogonal test

样品组	评价指标															
	色泽				滋味				口感				组织形态			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
1	1	3	2	4	0	2	4	4	0	1	4	5	1	1	5	3
2	5	3	2	0	4	3	3	0	6	4	0	0	6	3	1	0
3	1	2	1	6	0	2	3	5	1	2	3	4	2	1	1	6
4	2	2	5	1	3	1	4	2	3	2	4	1	2	1	5	2
5	2	1	5	2	2	1	5	2	2	2	4	2	1	3	4	2
6	2	3	4	1	2	1	4	3	1	3	4	2	2	3	4	1
7	6	3	1	0	5	3	1	1	5	2	3	0	6	4	0	0
8	4	3	2	1	5	4	1	0	4	3	2	1	5	3	2	0
9	5	3	1	1	7	2	0	1	6	2	2	0	5	2	2	1

$$R_1=\begin{vmatrix}0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.4\\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4\\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.5\\ 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.3\end{vmatrix}\quad R_2=\begin{vmatrix}0.5 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0\\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0\\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0\end{vmatrix}\quad R_3=\begin{vmatrix}0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.6\\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.5\\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4\\ 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.6\end{vmatrix}\quad R_4=\begin{vmatrix}0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.1\\ 0.3 & 0.1 & 0.4 & 0.2\\ 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.1\\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.2\end{vmatrix}$$

$$R_5=\begin{vmatrix}0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.2\\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.2\\ 0 & 0.3 & 0.1 & 0.6\\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.5\end{vmatrix}\quad R_6=\begin{vmatrix}0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1\\ 0.2 & 0.1 & 0.4 & 0.3\\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1\end{vmatrix}$$

$$R_7=\begin{vmatrix}0.6 & 0.3 & 0.1 & 0\\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1\\ 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0\\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0\end{vmatrix}\quad R_8=\begin{vmatrix}0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1\\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0\\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1\\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0\end{vmatrix}$$

$$R_9=\begin{vmatrix}0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1\\ 0.7 & 0.2 & 0 & 0.1\\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0\\ 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0.1\end{vmatrix}$$

评定结果 R 为模糊数学感官评价权重集×模糊数学矩阵，即 R_1=（0.044，0.173，0.378，0.405），R_2=（0.52，0.327，0.153，0），R_3=（0.093，0.178，0.212，0.517），R_4=（0.256，0.149，0.444，0.151），R_5=（0.252，0.252，0.201，0.405），R_6=（0.173，0.242，0.4，0.185），R_7=（0.544，0.295，0.132，0.029），R_8=（0.451，0.329，0.171，0.049），R_9=（0.585，0.126，0.12，0.073）。

2.2.2 模糊评价结论

表 7 正交试验感官评价结果分析

Table 7 Analysis of sensory evaluation results of orthogonal test

样品组	A	B	C	D	感官得分
1	a	a	a	a	68.56
2	a	b	b	b	83.67
3	a	c	c	c	68.47
4	b	a	b	c	75.1
5	b	b	c	a	76.28
6	b	c	a	b	74.03
7	c	a	c	b	83.54
8	c	b	a	c	81.82
9	c	c	b	a	78.93
k_a	80.29	75.73	74.80	74.59	
k_b	75.14	80.41	79.23	80.59	
k_c	81.43	73.81	76.10	75.13	
R	6.293	6.78	4.327	5.84	

正交试验糊感官评价结果各如表 6 所示，每个样品的最后得分 $R=U\times T$。由表 7 正交试验感官评价结果分析可知各因素对肉饼品质的影响大小顺序为：凝胶油浓度>水分添加量>复合磷酸盐添加量>卡拉胶添加量。最优工艺条件为 $A_cB_bC_bD_b$，即凝胶油浓度为 10%，复合磷酸盐及卡拉胶添加量为 0.3%，水分添加量为 20%。

2.3 验证试验

对试验结果进行验证，通过最佳的条件，卡拉胶和复合磷酸盐添加量 0.3%，凝胶油浓度 10%，水的添加量 20%制备产品，并做六次平行试验。最终得到的实际感官评分为 88.34±2.18，与模糊感官评分值相近，产品感官性质较优，证实优化后的参数准确可靠，具有实用价值。

3 结论

本试验以蜂蜡制备的菜籽基凝胶油和牛肉为原料，采用模糊数学综合评价法对凝胶油替代脂肪制备肉饼的工艺进行感官评价，优化的凝胶油替代脂肪生产牛肉饼的最佳配方为凝胶油浓度 10%复合磷酸盐及卡拉胶添加量 0.3%，水分添加量 20%下，模糊数学综合评判结果集 R=（0.607，0.349，0.073，0），感官评价得分为 87.60，表明蜂蜡制备凝胶油替代脂肪生产牛肉饼工艺可行，为此类新型肉制品工业化生产奠定理论基础。

参考文献

[1] Utrera Mariana, D Morcuende, Estévez, et al. Fat content has a significant impact on protein oxidation occurred during frozen storage of beef patties [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 56(1): 62-68

[2] Khalil A H. The influence of carbohydrate-based fat replacers with and without emulsifiers on the quality characteristics of lowfat patties [J]. Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht), 1998, 52(4): 299-313

[3] Martin Jean Marie, Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers [J]. Marine Chemistry, 1979, 7(3): 173-206

[4] Shiota K, Kawahara S, Tajima A, et al. Sensory evaluation of beef patties and sausages containing lipids with various component fatty acids [J]. Meat Science, 1995, 40(3): 0-371

[5] Marquez E, Ahmed E, West R, et al. Emulsion stability and sensory quality of beef frankfurters produced at different fat or peanut oil levels [J]. Journal of Food Science, 1989, 54(4), 867

[6] Baer Arica A, Dilger A C. Effect of fat quality on sausage processing, texture, and sensory characteristics [J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1242-1249

[7] Marquez E, Ahmed E, West R, et al. Emulsion stability and sensory quality of beef frankfurters produced at different fat

or peanut oil levels [J]. Journal of Food Science, 1989, 54(4): 867-873

[8] Youssef M K, Barbut S. Fat reduction in comminuted meat products-effects of beef fat, regular and pre-emulsified canola oil [J]. Meat Science, 2010, 87(4): 35-26

[9] Dzudie T, Kouebou C, Essia-Ngang J, et al. Lipid sources and essential oils effects on quality and stability of beef patties [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(1): 67-72

[10] Singh F I, Auzanneau M A, Rogers. Advances in edible oleogel technologies-A decade in review [J]. Food Research International, 2017, 97: 307-317

[11] Toro-vazquez J, Morales-rueda, J, et al. Thermal and textural properties of orgnogels developed by candelilla wax in safflower oil [J]. Journal of American Chemists' Society, 2007, 84(11), 989-1000

[12] 钟金锋,覃小丽,刘雄.凝胶油及其在食品工业中的应用研究进展[J].食品科学,2015,36(3):272-279
ZHONG Jin-feng, Qin Xiao-li, LIU Xiong. Research progress of gel oil and its application in food industry [J]. Food Science, 2015, 36(3): 272-279

[13] Blake A I, Co E D, Marangoni A G. Structure and physical properties of plant wax crystal networks and their relationship to oil binding capacity [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2014, 91(6): 885-903

[14] Wolfer T L. Fats, oils, and oleogels: Their significance in and impacts on comminuted meat products [D]. Iowa State University, 2017

[15] 刘日斌,朱建华,叶俊,等.葵花籽油凝胶油的制备及其在冰淇淋中的应用[J].中国油脂,2018,43(1):107-111,130
LIU Ri-bin, ZHU Jian-hua, YE Jun, et al. Preparation of sunflower seed gel oil and its application in ice cream [J] .China Oils and Fats, 2018, 43(1): 107-111, 130

[16] Zetzl A K, Marangoni A G, Barbut S. Mechanical properties of ethylcellulose oleogels and their potential for saturated fat reduction in frankfurters [J]. Food & Function, 2012, 3(3): 327

[17] Barbut S, Wood J, Marangoni A G. Effects of organogel hardness and formulation on acceptance of frankfurters: Effects of organogel hardness on frankfurters [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(9): C2183

[18] Maryam M, Nafiseh S, Sayed A, et al. Production of sesame oil oleogels based on beeswax and application as partial substitutes of animal fat in beef burger [J]. Food Research International, 2018, 108: 368-377

[19] Wolfer T L, Acevedo N C, Prusa K J, et al. Replacement of pork fat in frankfurter-type sausages by soybean oil oleogels structured with rice bran wax [J]. Meat Science, 2018, 145: 352-362

[20] 霍红.模糊数学在食品感官评价质量控制方法中的应用[J].食品科学,2004,6:185-188
HUO Hong. Application of fuzzy mathematics in quality control method of food sensory evaluation [J]. Food Science, 2004, 6: 185-188

[21] 张志超,周显青,张乃建,等.模糊数学感官评价法优化糯米团制作工艺[J].粮油食品科技,2015,23(3):1-6
ZHANG Zhi-chao, ZHOU Xian-qing, ZHANG Nai-jian, et al. Fuzzy math sensory evaluation method to optimize the production process of glutinous rice balls [J]. Cereals, Oils and Food Science and Technology, 2015, 23(3): 1-6

[22] 赵月,邹德智,李婷婷,等.米糠蜡对稻米油基凝胶油形成的影响及动力学[J].食品科学,2017,38(23):59-64
ZHAO Yue, ZOU De-zhi, LI Ting-ting, et al. Effect and kinetics of rice bran wax on the formation of rice oil-based gel oil [J] .Food Science, 2017, 38(23): 59-64

[23] 李龙祥,赵欣欣,孔保华.复合磷酸盐添加量对调理重组牛肉品质特性的影响[J].食品研究与开发,2017,2:11-15,95
LI Long-xiang, ZHAO Xin-xin, KONG Bao-hua. Effect of compound phosphate on quality characteristics of conditioned recombinant beef [J]. Food Research and Development, 2017, 2: 11-15, 95

[24] 尚祖萍.牛肉重组方法及效果研究[D].长春:吉林大学,2011
SHANG Zu-ping. Study on the method and effect of beef recombination [D]. Changchun: Jilin University, 2011

[25] 张慧.重组牛肉生产工艺研究[J].饲料博览,2017,7:43-45
ZHANG Hui. Research on production technology of recombinant beef [J]. Feed Expo, 2017, 7: 43-45

[26] 张毅超.中式重组火腿粘合剂配方及工艺条件优化的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2016
ZHANG Yi-chao. Study on the optimization of Chinese recombinant ham adhesive formula and process conditions [D]. Harbin: Harbin Commercial University, 2016