

# 基于响应面法的双螺杆挤压杂粮冲调粉的配方优化研究

李家骏<sup>1</sup>, 刘媛媛<sup>1</sup>, 陈烁州<sup>1</sup>, 门希臣<sup>2</sup>, 刘涛<sup>1</sup>, 王利文<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>河北农业大学食品科技学院, 河北 保定

<sup>2</sup>河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年2月9日; 发布日期: 2024年2月22日

## 摘要

本研究以双螺杆挤压处理后的苦荞、燕麦和黑豆的混合粉(三者质量比52:35:13)为主要原料, 以感官评分为评价指标, 通过单因素试验和响应面试验对即食杂粮粉进行配方优化, 得到适宜的杂粮粉配方为: 杂粮粉(苦荞、燕麦、黑豆) 63.8%, 脱脂奶粉21.3%, 零卡糖8.5%, 三氯蔗糖0.04%, 填充粉(魔芋精粉: 菊粉 = 1:1, m:m) 6.4%, 冲调后杂粮粉的感官评分为 $88.8 \pm 2.6$ , 冲调得到的杂粮粉颜色均匀, 甜度适中, 口感柔和细腻。本研究为杂粮类冲调产品的开发提供了理论依据。

## 关键词

杂粮, 冲调粉, 双螺旋挤压, 配方优化

# Study on Formulation Optimization of Twin-Screw Extrusion Mixed Grain Powder Based on Response Surface Method

Jiajun Li<sup>1</sup>, Yuanyuan Liu<sup>1</sup>, Shuozhou Chen<sup>1</sup>, Xichen Men<sup>2</sup>, Tao Liu<sup>1</sup>, Liwen Wang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei

<sup>2</sup>College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei

Received: Dec. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2024

## Abstract

The main raw material in this study was a blend of tartary buckwheat, oat and black bean, which

\*通讯作者。

文章引用: 李家骏, 刘媛媛, 陈烁州, 门希臣, 刘涛, 王利文. 基于响应面法的双螺杆挤压杂粮冲调粉的配方优化研究[J]. 食品与营养科学, 2024, 13(1): 109-117. DOI: 10.12677/hjfn.2024.131014

had undergone twin-screw extrusion treatment, with a mass ratio of 52:35:13. The sensory score was then used as the evaluation index. Formulation optimization was carried out to obtain the appropriate formula of multigrain flour as follows: multigrain flour (tartary buckwheat, oat, black bean) 63.8%, skim milk powder 21.3%, zero calorie sugar 8.5%, sucralose 0.04%, filling powder (konjac essence powder: inulin = 1:1, m:m) 6.4%. The sensory score of the ready-to-eat multigrain flour was  $88.8 \pm 2.6$ , and the multigrain flour had uniform color, moderate sweetness, and soft and delicate taste. These results provide a theoretical basis for the development of multigrain products.

## Keywords

Whole Grains, Ready-to-Eat Flour, Twin-Screw Extrusion, Formulation Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

由于社会生活结构形式的转变、日常生活节拍的提高、习惯和物质组成的改善及人口老龄化, 体重症、高血糖等缓慢病症已变成人类日渐关心的问题。高能量和碳水化合物的饮食习惯、运动量不足以及久坐不动的状态增加了肥胖和胰岛素抵抗的发生率[1]。根据 2023 年的最新统计, 2030 年时, 全国成年、儿童、青少年的体重增长比例将会显著提高, 其中 31.8% 的人口将会增加, 5892 万的体重增长比例将会进一步增加。《中国心血管健康与疾病报告 2022》提醒, 为了更好地保护公众的健康, 政府应当采取更加严格的措施来控制体重增长, 并加强对公众健康状况的监测, 以期减轻公众的负担, 促进健康的生活方式的改变[2]。今年慢性代谢疾病、肿瘤以及其他慢性疾病的患病率都远低于往年[3]。大量研究数据表明, 健康的饮食模式对于调节机体代谢, 减少身体炎症以及降低患糖尿病、心血管疾病、高血压、肥胖和癌症的风险[4]有积极作用。一项对超过 50 万名成年人的长期研究显示, 那些遵循健康饮食模式的人, 其患癌症的风险降低了 10%。该研究指出富含蔬菜、水果、全谷物和鱼类的饮食模式与较低的癌症风险相关。随着人们对健康的重视, 消费者对保健型、营养型、特殊型食品的需求日益增加, 开发营养均衡的功能食品是当前食品市场的发展趋势[5]。

杂粮营养价值丰富, 含有多种药用成分及功能活性物质, 如不饱和脂肪酸、膳食纤维、维生素、黄酮、类固醇、生物碱与多酚类化合物等[6][7], 越来越多的证据表明杂粮在调节血糖、降低血脂、降低血压、预防冠心病方面具有重要的作用, 可作为药食同源的保健食品有效预防慢性疾病的发生[8]。一项发表在《营养学杂志》的研究指出, 荞麦中的黄酮类化合物能够降低血压, 这可能与抗氧化作用和对血管内皮功能的改善有关。此外, 这些化合物还可能有助于预防心血管疾病, 因为它们能够减少氧化应激, 这是心血管疾病发展的一个重要因素。但与精细白米相比, 杂粮因其膳食纤维含量高导致口感粗糙, 不易被消费者所接受[9]。与传统蒸煮方法相比, 挤压膨化技术具有更高的加工效率和更低的生产成本, 被广泛应用于食品加工领域。原料中的大分子物质在挤压过程中受到水分、压力、温度和剪切力的共同作用发生降解和结构改变[10], 能有效提高杂粮产品的适口性。

因此, 本研究以经过双螺杆挤压的苦荞、燕麦和黑豆粉为主要原料, 通过单因素试验和响应面试验优化杂粮粉配方, 制备一种适口性良好, 营养丰富且方便即食的杂粮粉, 为杂粮产品经济附加值的提高

以及通过合理科学膳食预防肥胖及相关慢性疾病提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 材料与试剂

#### 2.1.1. 试验材料

苦荞、燕麦、黑豆，均购于河北省保定市保国粮油总部，所有原料均粉碎过 60 目筛，以一定比例混合(三者质量比 52:35:13)进行双螺杆挤压，然后粉碎过 80 目筛，装袋塑封常温下保存备用。

#### 2.1.2. 主要试剂

试验主要试剂如表 1 所示。

**Table 1.** Main reagents and manufacturers

**表 1.** 主要试剂及生产厂家

试剂	生产厂家
脱脂奶粉	恒天然商贸(上海)有限公司
禾昔零卡糖(复配甜味剂)	浙江华康药业股份有限公司
食品级三氯蔗糖	山东三和维信生物科技有限公司
魔芋粉	亳州市华之堂生物科技有限公司
菊粉	重庆骄王天然产物股份有限公司

### 2.2. 仪器设备

试验所需仪器设备如表 2 所示。

**Table 2.** Main equipment and manufacturers

**表 2.** 主要设备及生产厂家

设备及型号	生产厂家
双螺杆挤压膨化机(LT36L)	山东济南真诺机械有限公司
实验磨粉机(MLU-202)	无锡布勒机械制造有限公司

### 2.3. 试验设计方法

#### 2.3.1. 挤压杂粮粉的配方优化

将适宜工艺条件下挤压得到的复配杂粮粉碎过筛至 80 目，得到的杂粮粉添加一定量的脱脂奶粉、零卡糖(赤藓糖醇 99.78%、甜菊糖苷 0.14%、罗汉果甜苷 0.08%)、三氯蔗糖和填充粉(魔芋精粉:菊粉 = 1:1, m:m)，加入适量的 85℃热水冲调(m:V = 1:6)，以感官评分为指标确定挤压杂粮粉的适宜配方。

##### 1) 配方优化的单因素试验设计

以 6 g 挤压杂粮粉为基础，对脱脂奶粉、零卡糖、三氯蔗糖和填充粉添加量按表 3 所示水平进行单因素试验，研究对挤压杂粮粉冲调后感官品质的影响。

##### 2) Box-Behnken 试验设计优化挤压杂粮粉配方

基于 1) 的实验结果，我们采用 Box-Behnken 设计的实验，将不同的因素水平列出，并以感官评分作为反馈，通过响应面分析，确定最佳的挤压杂粮粉复合配方(表 4)。

**Table 3.** Single factor test factor level**表 3.** 单因素试验因素水平

实验因素	水平				
	1	2	3	4	5
脱脂奶粉/g	0.5	1	1.5	2	2.5
零卡糖/g	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
三氯蔗糖/g	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010
填充粉/g	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

**Table 4.** Displays the response surface test factor level**表 4.** 响应面试验因素水平表

水平	因素			
	脱脂奶粉/g	零卡糖/g	三氯蔗糖/g	填充粉/g
-1	1.5	0.6	0.002	0.4
0	2	0.8	0.004	0.6
1	2.5	1.0	0.006	0.8

### 2.3.2. 杂粮粉配方感官评分

由 10 位感官评价员分别对冲调后复配杂粮粉的色泽、风味、冲调性能、口感滋味进行评价。参考李新华[11]的评分原则并适当修改，具体评分要求如表 5 所示。

**Table 5.** Sensory rating criteria table**表 5.** 感官评分标准表

评价指标	描述	得分
色泽 (20 分)	色泽均匀，呈黄绿色	15~20
	色泽较均匀，呈淡黄绿色	8~14
	色泽不均匀，偏奶白色	1~7
风味 (20 分)	挤压杂粮特有的香味和奶香味协调，香气纯正浓郁	15~20
	挤压杂粮和奶香味较协调，香气较宜，无不佳气味	8~14
	挤压杂粮和奶香味不协调，香气不宜	1~7
冲调性能 (30 分)	搅拌后成均匀糊状	21~30
	稍有结块，搅拌后溶解	11~20
	结块较多，不易溶解	1~10
口感滋味 (30 分)	口感柔和细腻，无砂粒感，甜度适中，适口性好	21~30
	口感粗糙，稍有砂粒感，甜度一般，适口性较好	11~20
	口感粗糙，有砂粒感，过甜或过苦，适口性差	1~10

### 2.4. 数据统计分析

数据的统计分析使用 SPSS (24.0 版本)及 Excel 2019 软件，绘图分析使用 Origin2019b 软件。显著性

分析采用 Duncan's 多极差检验,  $P < 0.05$  被认为在整个研究中具有统计学意义。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 挤压杂粮粉配方的单因素优化结果

根据图 1(a)的数据, 脱脂奶粉的加入量会干扰杂粮粉的感官评价。在图中, 当脱脂奶粉的浓度达到 2.0 g 时, 杂粮粉的感官评分达到了顶峰, 表现出了一种均匀的黄绿色, 并且具备了独具一格的奶香气息, 使得杂粮粉的口感更加温润, 更具有舒适感。当脱脂奶粉的添加量大于 2.0 g 时, 奶香味会掩盖挤压杂粮粉的风味, 影响杂粮粉的整体感官评价。所以选择脱脂奶粉添加量为 2.0 g 进行后续响应面优化。

根据图 1(b), 当零卡糖添加量达到 0.8 g 时, 挤压杂粮粉的口感变得更加柔和, 而且其感官评分也达到了最佳水平。当零卡糖添加过量时, 甜度增加, 适口性变差, 感官评分降低。所以选择零卡糖添加量为 0.8 g 进行后续响应面优化。

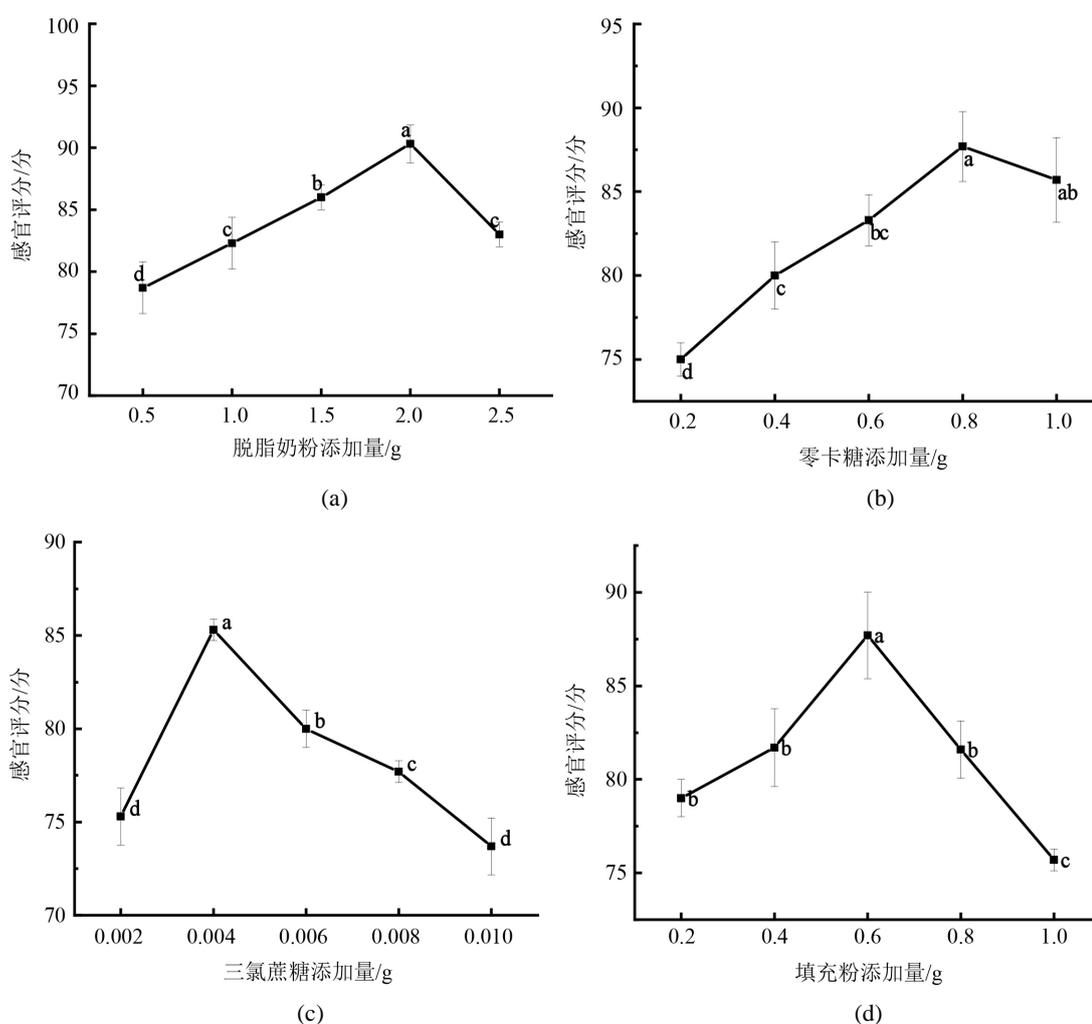


Figure 1. Single factor results of formula optimization  
图 1. 配方优化单因素结果

根据图 1(c), 三氯蔗糖的加入量会负面影响挤压杂粮粉的感官评价。从图上看, 0.004 g 时, 杂粮粉

的感官评分达到了顶峰，其口感也十分清新；而若三氯蔗糖的添加量大于此，杂粮粉的感官评分将会下滑，因为其甜度会变得更加明显，而且回味也会变得更加苦涩。所以选择三氯蔗糖添加量为 0.004 g 进行后续响应面优化。

根据图 1(d)的数据，当填充粉添加量达到 0.6 g 时，杂粮粉的口感变得更加细腻，质地也更加均匀；然而，若添加量超过此值，产品的黏度会增大，使得冲调过程变得更加困难，从而导致感官评分的下降。所以选择填充粉添加量为 0.6 g 进行后续响应面优化。

### Box-Behnken 响应面优化杂粮粉配方试验结果

#### 1) 响应面试验结果与回归方程拟合

通过使用 Design-Expert13 软件，我们可以使用多项式回归来研究实验信息。根据表 6 的数据分析，我们发现，感知评分 G 与其他四个自然因素 A、B、C 和 D 之间的关系是  $G = 88.80 - 1.75B - 3.58C - 2.83D - 3.5AC - 2.5BD - 5.11A^2 - 4.73B^2 - 9.23C^2 - 8.11D^2$ 。

Table 6. Response surface test design and results

表 6. 响应面试验设计与结果

序号	A 脱脂奶粉/g	B 零卡糖/g	C 三氯蔗糖/g	D 填充粉/g	G 感官评分/分
1	2	1	0.004	0.8	71
2	2	0.8	0.004	0.6	92
3	2	0.8	0.002	0.4	80
4	2	0.8	0.002	0.8	73
5	1.5	0.6	0.004	0.6	83
6	1.5	0.8	0.006	0.6	76
7	2.5	0.6	0.004	0.6	82
8	2.5	0.8	0.004	0.8	70
9	2	1	0.002	0.6	76
10	2	1	0.006	0.6	69
11	2	0.6	0.004	0.8	78
12	2	0.8	0.004	0.6	89
13	2	0.8	0.006	0.8	64
14	1.5	1	0.004	0.6	79
15	2.5	0.8	0.006	0.6	67
16	2	0.6	0.002	0.6	79
17	2	0.8	0.004	0.6	85
18	2.5	0.8	0.004	0.4	79
19	2	0.8	0.006	0.4	72
20	2	0.6	0.006	0.6	72
21	2	0.8	0.004	0.6	88
22	1.5	0.8	0.004	0.4	77
23	2	1	0.004	0.4	79

续表

24	1.5	0.8	0.002	0.6	75
25	2.5	0.8	0.002	0.6	80
26	2	0.6	0.004	0.4	76
27	2	0.8	0.004	0.6	90
28	1.5	0.8	0.004	0.8	73
29	2.5	1	0.004	0.6	75

## 2) 响应面模型方差及可行性分析

根据表 7 的数据, 我们发现  $P < 0.0001$ , 而  $P > 0.05$ , 这意味着我们的模型的失拟度并不是很严重, 因此我们认为它还是非常适用的。此外, 我们还发现  $R^2 = 0.9543$ ,  $R^2_{Adj} = 0.9086$ , 这意味着我们的模型能够很好地拟合现场的数据, 并能够解释 90.86% 的反馈。在一次项中, 三氯蔗糖和填充粉添加量对感官评分的影响极显著 ( $P < 0.01$ ); 零卡糖添加量对感官评分的影响显著 ( $P < 0.05$ ); 脱脂奶粉添加量对感官评分的影响不显著。根据回归方程一次项系数绝对值的大小, 可知影响感官评分的主次因素为 C (三氯蔗糖) > D (填充粉) > B (零卡糖) > A (脱脂奶粉) 经过研究发现, 二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  和  $D^2$  的影响力都非常显著, 其中 AC 的影响力更是极大 ( $P < 0.01$ ), 而交互项 BD 也表现出了显著的影响力, 其中  $P < 0.05$ 。

**Table 7.** Variance and feasibility analysis of regression models

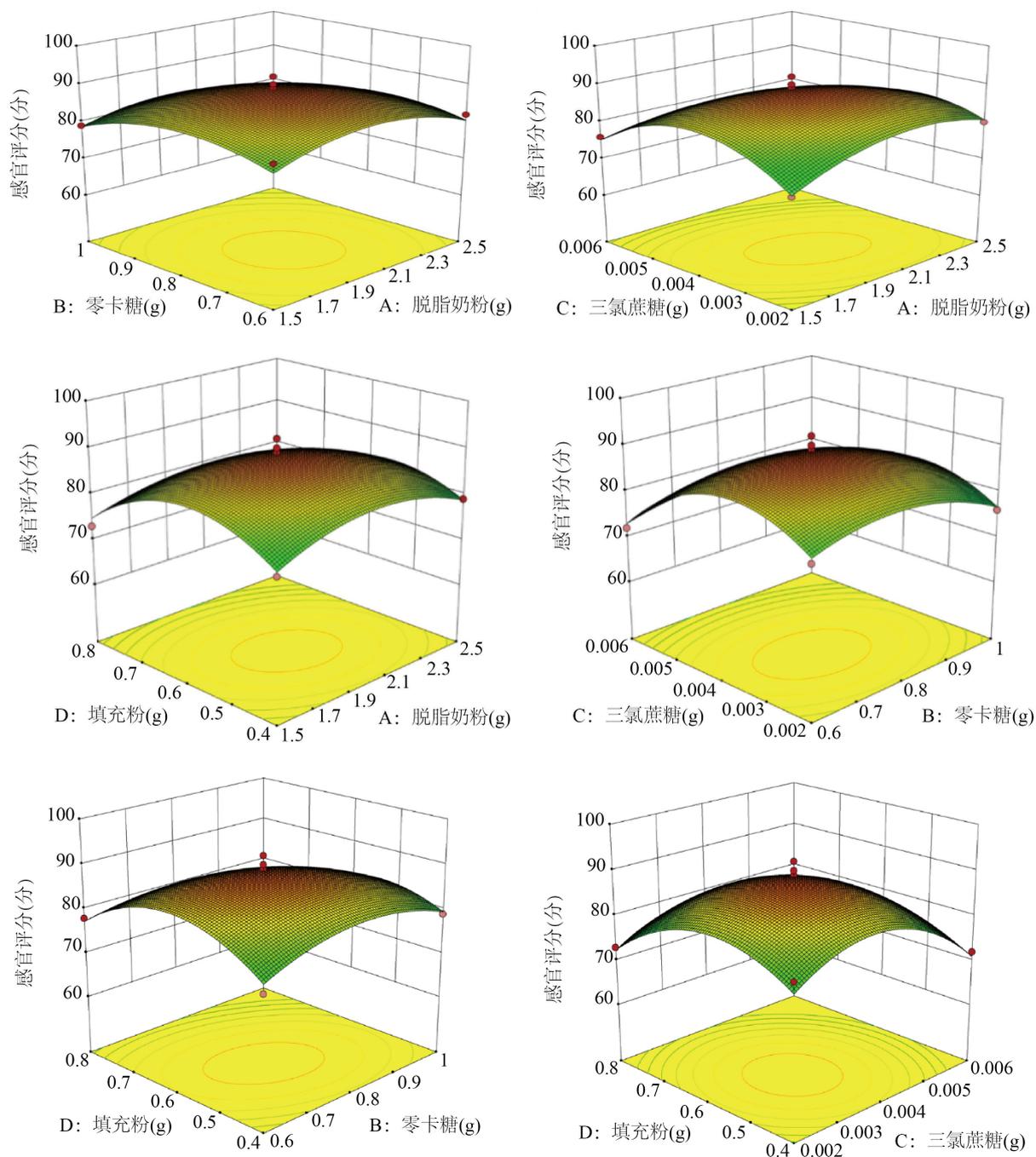
**表 7.** 回归模型方差及可行性分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1260.79	14	90.06	20.88	<0.0001	**
A-脱脂奶粉	8.33	1	8.33	1.93	0.1862	
B-零卡糖	36.75	1	36.75	8.52	0.0112	*
C-三氯蔗糖	154.08	1	154.08	35.72	<0.0001	**
D-填充粉	96.33	1	96.33	22.34	0.0003	**
AB	2.25	1	2.25	0.5217	0.4820	
AC	49.00	1	49.00	11.36	0.0046	**
AD	6.25	1	6.25	1.45	0.2486	
BC	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
BD	25.00	1	25.00	5.80	0.0304	*
CD	0.2500	1	0.2500	0.0580	0.8132	
$A^2$	169.27	1	169.27	39.24	<0.0001	**
$B^2$	145.33	1	145.33	33.69	<0.0001	**
$C^2$	553.00	1	553.00	128.21	<0.0001	**
$D^2$	426.45	1	426.45	98.87	<0.0001	**
残差	60.38	14	4.31			
失拟项	33.58	10	3.36	0.5012	0.8287	
纯误差	26.80	4	6.70			
矫正总值	1321.17	28				

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

### 3) 交互作用分析结果

通过使用感官评分作为指标,我们发现各种因素之间会相互影响杂粮粉的感官评价(图 2)。根据图像,我们可以看出,添加脱脂奶粉和零卡糖对杂粮粉的感官评价没有显著影响,而添加三氯蔗糖和零卡糖则会产生类似椭圆形的交互作用,并且  $P < 0.01$ ,表明这两者对杂粮粉的感官评价有着非常显著的影响。此外,零卡糖和填充粉的添加量也会产生类似椭圆形的交互作用,表明它们对杂粮粉的感官评价有着重要



**Figure 2.** A diagram of the interaction effect of various factors on sensory score is depicted in response surface

**图 2.** 展示了多个因素相互作用对感官评分的显著影响,其表现形式为反射面图

的影响。经过方差分析,  $P < 0.05$ , 表明杂粮粉的感官评价受到了显著的影响, 而这一结论也得到了表 7 和图 2 中的证实。

#### 4) 验证试验

使用统计分析软件 Design-Expert 13, 以感官评分为响应值优化杂粮粉的配方为添加脱脂奶粉 2.007 g, 零卡糖 0.771 g, 三氯蔗糖 0.0036g, 填充粉 0.57 g, 预测感官评分为 89.48。根据实际情况调整为脱脂奶粉 2.0 g, 零卡糖 0.8 g, 三氯蔗糖 0.004 g, 填充粉 0.6 g, 即最终的杂粮粉配方中各原料占比分别为: 杂粮粉 63.8%, 脱脂奶粉 21.3%, 零卡糖 8.5%, 三氯蔗糖 0.4%, 填充粉 6.4%。经验证, 此配方下的杂粮粉经冲调后颜色均匀, 甜度适中, 稠度适中, 口感柔和细腻, 杂粮粉感官评分为  $88.8 \pm 2.6$ , 经过响应面法优化的杂粮粉配方与预期结果相当接近, 这表明它具有良好的可重复性, 可以在实践中得到广泛的应用。

## 4. 结论

本研究通过单因素试验分别测定脱脂奶粉、零卡糖、三氯蔗糖及填充粉添加量对冲调杂粮粉感官评分的影响, 得出脱脂奶粉添加量为 2.0 g, 零卡糖添加量为 0.8 g, 三氯蔗糖添加量为 0.004 g, 填充粉添加量为 0.6 g 时感官评分最高。并对预测配方进行了验证。结果表明, 优化后的杂粮粉配方中各原料占比分别为: 杂粮粉 63.8%, 脱脂奶粉 21.3%, 零卡糖 8.5%, 三氯蔗糖 0.4%, 填充粉 6.4%。这一杂粮速溶冲调粉产品配方具有优良的感官特性, 应用前景广阔, 为今后杂粮精深加工以及多谷物营养健康功能食品的开发奠定了基础。

## 基金项目

2020 年度河北省引进留学人员资助项目(项目编号 C20200333), 项目名称: 低血糖生成指数的多谷物速食营养粉加工关键技术研究; 2021 年度河北省引进国外智力项目: 杂粮方便食品加工关键技术研究及其功能评价(无项目编号)。

## 参考文献

- [1] Srikaeo, K. and Arranz-Martínez, P. (2015) Formulating Low Glycaemic Index Rice Flour to Be Used as a Functional Ingredient. *Journal of Cereal Science*, **61**, 33-40.
- [2] 周冯琦, 程进, 陈宁, 等. 中国环境绩效管理理论与实践[M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 2022.
- [3] 中国心血管健康与疾病报告 2022 概要[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(6): 583-612.
- [4] 杨柳青, 田红梅, 石汉平. 三种饮食模式与慢性疾病研究进展[J]. 首都医科大学学报, 2022, 43(2): 311-320.
- [5] 常巧英, 余强, 郑冰, 等. 营养健康食品开发技术发展趋势探析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 266-274. <https://doi.org/10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2023.09.031>
- [6] Idehen, E., Tang, Y. and Sang, S. (2017) Bioactive Phytochemicals in Barley. *Journal of Food and Drug Analysis*, **25**, 148-161.
- [7] Lie, L., Brown, L., et al. (2018) The Association of Dietary Fiber Intake with Cardiometabolic Risk in Four Countries across the Epidemiologic Transition. *Nutrients*, **10**, 628. <https://doi.org/10.3390/nu10050628>
- [8] Seal, C.J., Courtin, C.M., Venema, K. and de Vries, J. (2021) Health Benefits of Whole Grain: Effects on Dietary Carbohydrate Quality, the Gut Microbiome, and Consequences of Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **20**, 2742-2768. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12728>
- [9] Zhu, F. (2015) Interactions between Starch and Phenolic Compound. *Trends in Food Science & Technology*, **43**, 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.003>
- [10] Alam, M.S., Kaur, J., Khaira, H., and Gupta, K. (2016) Extrusion and Extruded Products: Changes in Quality Attributes as Affected by Extrusion Process Parameters: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **56**, 445-473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
- [11] 李新华, 张晓茜. 速食营养杂粮粉配方优化设计研究[J]. 粮食加工, 2013, 38(1): 57-60.