

响应面法优化富含益生元的代餐粉配方

丁丽娜¹, 李淑倩^{1,2}, 宁杰¹, 顾海燕^{1,2}, 杨盈¹, 丁文字¹, 张宪党², 王志斌^{1*}

(1. 山东第一医科大学附属内分泌与代谢病医院, 山东省内分泌与代谢病研究所, 山东济南 250062)

(2. 山东第一医科大学(山东省医学科学院), 山东济南 250118)

摘要: 该研究利用响应面法优化一款富含益生元的代餐粉配方。利用高溶胀系数和具有饱腹感的魔芋精粉, 添加具有改善肠道菌群的菊粉、低聚果糖、低聚异麦芽糖益生元, 添加大豆分离蛋白、植物甾醇酯、木糖醇、香芋粉、三氯蔗糖成分, 以代餐粉感官评分为指标, 通过单因素试验、Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验优化产品配方, 并进行产品质量评价。结果显示, 利用响应面方法优化得到最优配方为魔芋精粉添加量 3.42 g、大豆分离蛋白 0.80 g、植物甾醇酯 0.23 g、益生元组合 8.00 g (菊粉 2.50 g、低聚果糖 2.50 g、低聚异麦芽糖 3.00 g)、木糖醇 1.00 g、香芋粉 1.20 g、三氯蔗糖 0.005 g, 实际感官评分为 93.16。该配方代餐粉 50 s 即可充分溶解, 冲调性较好, 无颗粒, 色泽均匀一致, 口感细腻、黏度适中、味道纯正, 气味协调, 各理化指标及微生物检测按照国家食品相关标准进行了检测, 结果均与添加量基本一致, 符合国家标准。

关键词: 肥胖; 代餐粉; 肠道菌群; 魔芋; 响应面法

文章编号: 1673-9078(2021)11-96-105

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0322

Optimization of Prebiotic-rich Meal Replacement Powder Formulation Using the Response Surface Methodology

DING Li'na¹, LI Shuqian^{1,2}, NING Jie¹, GU Haiyan^{1,2}, YANG Ying¹, DING Wenyu¹, ZHANG Xiandang²,
WANG Zhibin^{1*}

(1. Endocrine and Metabolic Diseases Hospital of Shandong First Medical University, Shandong Institute of Endocrine and Metabolic Diseases, Jinan 250062, China)

(2. Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Science, Jinan 250118, China)

Abstract: A meal replacement powder formulation rich in prebiotics was optimized using the response surface methodology (RSM) in this study. Since konjac exhibits a high swelling coefficient as well as high satiety and prebiotics, such as inulin, fructo-oligosaccharide, and isomalto-oligosaccharide, which can improve the intestinal flora, it was used to produce the meal replacement powder together with soy protein isolate, phytosterol esters, xylitol, taro powder, and sucralose. The single-factor, Plackett-Burman, and Box-Behnken designs, and steepest ascent method were employed to optimize the meal replacement powder formulation. Subsequently, the optimal formulation of the powder was evaluated based on its sensory quality. The formulation of the meal replacement powder optimized using the RSM included 3.42 g konjac, 0.80 g soy protein isolate, 0.23 g phytosterol ester, 8.00 g prebiotics (combinations of 2.50 g inulin, 2.50 g fructo-oligosaccharide, and 3.00 g isomalto-oligosaccharide), 1.00 g xylitol, 1.20 g taro powder, and 0.005 g sucralose. The actual sensory score of the optimized meal replacement powder was 93.16±0.73, and the powder could fully dissolve in 50±6 s. The meal replacement powder could dissolve well with no particles left, and it exhibited a uniform color, delicate texture, moderate viscosity, pure taste, and no strange smell. Moreover the physical, chemical, and microbial properties of the meal replacement powder were determined according to the national food standards, and the results met the requirements.

引文格式:

丁丽娜,李淑倩,宁杰,等.响应面法优化富含益生元的代餐粉配方[J].现代食品科技,2021,37(11):96-105

DING Li'na, LI Shuqian, NING Jie, et al. Optimization of prebiotic-rich meal replacement powder formulation using the response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 96-105

收稿日期: 2021-03-25

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018YYSP030); 山东省自然科学基金项目(ZR2017YL009); 山东省医学科学院医药卫生科技创新工程

作者简介: 丁丽娜(1986-), 女, 助理研究员, 研究方向: 糖脂营养代谢与产品开发, E-mail: morningdln99@163.com

通讯作者: 王志斌(1984-), 男, 助理研究员, 研究方向: 糖尿病与肠道菌群, E-mail: zhibinking@163.com

Key words: obesity; meal replacement powder; gut microbiota; konjac; response surface methodology

代餐食品是为了满足成年人控制体重期间的一餐或两餐的营养需要,代替一餐或两餐,专门加工配制而成的一种控制能量食品^[1]。根据代餐食品可以满足一餐或两餐的营养需要或部分营养需要,分为代餐食品或部分代餐食品。近几年,国内代餐食品形式丰富多样,有代餐粉、代餐棒、代餐饼干、代餐奶昔、代餐粥等,具有快速便捷、高纤维、低热量、易饱腹等特点。

肥胖和超重目前已成为一种全球性最为紧迫的公共卫生问题之一。研究表明,肥胖是由于脂肪因子、促炎症因子等分泌增加及相关炎症信号的激活导致的一种慢性炎症性疾病,与糖尿病、心血管疾病、高血压和癌症等疾病的发生发展密切相关,并对卫生保健、经济和社会造成了巨大的挑战^[2,3]。尽管有减肥手术、药物、控制饮食、运动等防治超重或肥胖的手段,但由于手术的创伤性、药物的副作用、患者难以坚持等原因,目前对超重或肥胖的防治效果十分有限^[4]。

已有研究表明,益生元、益生菌和平衡膳食可以对导致肥胖的相关肠道菌群进行重塑,从而有助于体重调节^[5]。魔芋精粉是一种优良的可溶性膳食纤维,其主要成分是葡甘露聚糖,它具有强吸水性、高黏性、高膨胀性特点^[6];在功能上,葡甘露聚糖刺激肠道有益菌的生长,提高肠道屏障功能^[7],同时有助于抑制脂质合成从而调节脂质代谢^[8]等作用。菊粉,源自于菊芋或者菊苣块根,是一种天然果糖聚合物,由D-呋喃果糖分子以 β -(2,1)糖苷键连接而成的果聚糖,中国卫生部于2009年发布公告第5号文件批准菊粉为新食品原料,研究表明其对控制体重有显著作用^[9]。低聚果糖、低聚异麦芽糖是优良的水溶性膳食纤维,可以调节肠道菌群改善人体的微生态平衡。因此,随着肠道菌群变化导致肥胖机制的明确,越来越多的研究表明肠道菌群参与了炎症反应、脂代谢、脂质堆积,而造成脂类的过量吸收和能量稳态失衡,最终导致了肥胖^[10,11]。大多数益生元,都能被乳酸菌、双歧杆菌等益生菌利用而促进其增殖,改善肠道菌群结构^[12],影响能量代谢稳态^[13]、抑制致病菌、降低炎症^[14]、调节脂代谢和抑制脂质堆积^[15]等作用,从而产生减肥作用。

代餐粉作为一种代餐食品由于使用方便、营养丰富、效果显著等特点,倍受市场青睐。基于此,本文利用具有调节肠道菌群的菊粉、低聚果糖、低聚异麦芽糖等三种优质益生元组合,结合具有高溶胀系数、饱腹感的魔芋精粉和具有调节血脂功能的植物甾醇酯,添加大豆分离蛋白增加营养性,采用木糖醇、香

芋粉和三氯蔗糖调节口感,通过响应面优化方法研制一款富含益生元且增加饱腹感的代餐粉。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

魔芋精粉(葡甘露聚糖含量 $\geq 85\%$),购于湖北强森魔芋科技有限公司。菊粉、低聚果糖、低聚异麦芽糖、大豆分离蛋白、植物甾醇酯、木糖醇、香芋粉、三氯蔗糖等均为市售食品级。

QUINTIX224 电子天平,德国赛多利斯;全自动凯式定氮仪,丹麦福斯;原子吸收光谱仪,PE 等。

1.2 方法

1.2.1 代餐粉制备方法

本产品将所有原辅料过 80 目筛,按配方比例称量后混合均匀即可。

1.2.2 单因素试验

通过单因素试验研究魔芋精粉,益生元组合(菊粉:低聚果糖:低聚异麦芽糖为 5:5:6),大豆分离蛋白,植物甾醇酯,木糖醇,香芋粉,三氯蔗糖 7 个因素的添加量对代餐粉品质的影响。首先,保持其余因素固定在中间水平上不变,然后逐一对另外 1 个变量进行单因素试验。具体试验设计如表 1 所示。

表 1 单因素试验与水平

Table 1 Factors and levels of single-factor design

试验因素	水平				
	1	2	3	4	5
魔芋精粉/g	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
益生元组合/g	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
大豆分离蛋白/g	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
植物甾醇酯/g	0.1	0.3	0.6	0.9	1.2
木糖醇/g	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
香芋粉/g	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
三氯蔗糖/g	0.0025	0.0050	0.0075	0.0100	0.0125

1.2.3 Plackett-Burman 因素筛选试验

根据单因素试验结果,分析魔芋精粉、益生元组合、大豆分离蛋白、植物甾醇酯、木糖醇、香芋粉、三氯蔗糖 7 个因素的不同添加量对代餐粉品质影响的显著性。采用 Design-Expert 11.1.0.1 软件进行 Plackett-Burman 试验设计与数据处理,以确定影响显著的因素,具体试验设计见表 2。

表 2 Plackett-Burman 试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of Plackett-Burman design

水平	试验因素						
	A(魔芋精粉 添加量/g)	B(益生元组合 添加量/g)	C(大豆分离蛋白 添加量/g)	D(植物甾醇酯 添加量/g)	E(木糖醇 添加量/g)	F(香芋粉 添加量/g)	G(三氯蔗糖 添加量/g)
-1	3.0	8.0	0.7	0.1	0.75	1.0	0.004
1	5.0	10.0	0.9	0.6	1.50	1.4	0.006

表 3 Box-Behnken 试验因素与水平

Table 3 Factors and levels of Box-Behnken design

水平	试验因素		
	A(魔芋精粉添加量/g)	C(大豆分离蛋白添加量/g)	D(植物甾醇酯添加量/g)
-1	3.0	0.7	0.10
0	3.5	0.8	0.20
1	4.0	0.9	0.30

表 4 代餐粉的评分标准

Table 4 Sensory evaluation standards of meal replacement powder

项目	评分细则			权重
	好 (81~100 分)	一般 (61~80 分)	差 (60 分以下)	
色泽	色泽均匀一致	色泽一般	色泽不均匀	0.2
风味	香气协调	相对协调, 较淡原料味	个别原料味道突出	0.2
口感	口感滑腻, 黏度适口性佳	口感细腻, 黏度适口性中	颗粒口感, 黏度适口性差	0.3
冲调性	易冲调, 均匀无颗粒	少量微小疙瘩	有较多疙瘩, 甚至结块	0.3

1.2.4 Box-Behnken 试验设计优化代餐粉配方

根据 Plackett-Burman 试验结果, 筛选出魔芋精粉、大豆分离蛋白、植物甾醇酯 3 个因素为影响代餐粉品质的主要因素, 以代餐粉的感官评分为考察指标, 利用 Design-Expert 11.1.0.1 软件进行 Box-Behnken 试验设计、数据处理和预测优化最佳代餐粉配方。具体试验设计如表 3 所示。

1.2.5 感官评价指标

参照 GB/T 29602-2013《固体饮料》中感官检验项目结合本产品制定了感官评价标准, 如表 4 所示。由 8 名具有一定感官评价经验的同事组成感官评价小组, 采用盲法对每个样品分别从产品色泽、风味、口感和冲调性等进行评价赋分, 重复三次, 统计平均值。

1.2.6 代餐粉产品质量检测

代餐粉的各理化指标及微生物指标的检测均按照 GB/T 29602-2013《固体饮料》中要求, 对水分、蛋白质、铅、总砷、菌落总数、大肠菌群、霉菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌进行检测。

营养成分分析按照 GB 28050-2011《预包装食品营养标签通则》, 通过成分测定、中国食物成分表以及原料厂家提供的营养成分表, 对代餐粉中所含能量、蛋白质、脂肪、碳水化合物、膳食纤维、钠分别进行计算并绘制代餐粉的营养成分表。

冲调性测定: 取 15 g 代餐粉, 在 500 mL 烧杯中, 用 400 mL 50 °C 左右温水冲调, 边冲边搅拌, 记录搅拌至均匀的时间, 重复三次, 计算平均值。

1.3 数据统计分析

采用 Origin 2018 进行绘图分析, 利用 Design-Expert 11.1.0.1 软件进行响应面分析, 代餐试食前后比较采用 SPSS 23.0 进行配对 *t* 检验统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 魔芋精粉对代餐粉感官评分的影响

魔芋精粉的主要成分为葡甘露聚糖, 是一种不能被人体降解的水溶性膳食纤维, 热量低, 具有降低血糖、血脂、减肥和调节肠道菌群等功效^[6]。由于其具有 80~100 倍的溶胀系数, 能延缓胃排空、具有饱腹感、减少能量摄入和改善肠道菌群的特点, 所以魔芋精粉常用于减肥或辅助降血糖等保健食品或代餐食品的开发^[7]。由图 1 所示, 代餐粉的感官评分随着魔芋精粉添加量的增加而呈现先升高后降低的趋势, 魔芋精粉添加量少时, 冲调后的流动性好, 但不够饱腹; 随着魔芋精粉的添加溶液的粘度逐渐增大, 流动性变

差,影响代餐粉的口感和冲调性。当魔芋精粉添加增至4.0 g时感官评分达到最高。魔芋精粉添加适量,代餐粉冲调液具有口感细腻、粘稠度适宜的特点。

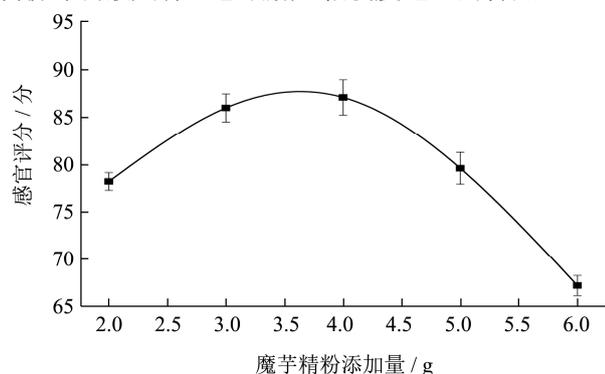


图1 魔芋精粉添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.1 The effect of konjac powder dosage on sensory score of meal replacement

2.1.2 益生元组合对代餐粉感官评分的影响

益生元是指不能通过人体胃肠消化道代谢吸收,却能在结肠中被特定的肠道微生物利用的食物成分^[18]。菊粉、低聚果糖、低聚异麦芽糖三种优质益生元均具有良好的口感和甜味,本实验中采用了菊粉、低聚果糖和低聚异麦芽糖按照5:5:6比例进行复配形成了益生元组合作为一整体因素,考察了益生元组合添加量对代餐粉感官评分的影响,如图2所示。随着益生元组合添加量的增加而呈现先升高后呈现缓慢下降的趋势,当益生元组合添加量为8.0 g时代餐粉的感官评分最高,再继续添加益生元组合,代餐粉口感甜腻,易使代餐粉冲调性稍变差,其感官评分逐渐下降。所以,益生元组合的最佳添加量范围为7.0~9.0 g。

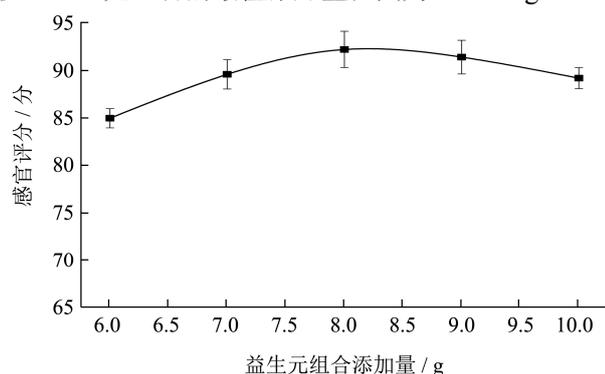


图2 益生元组合添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.2 The effect of prebiotics dosage on sensory score of meal replacement

2.1.3 大豆分离蛋白对代餐粉感官评分的影响

大豆分离蛋白是通过分离大豆油脂生产过程中的副产品-低变性脱脂大豆粕中主要蛋白质而制成的,是少数几种可替代动物蛋白的植物蛋白之一^[19]。大豆分离蛋白含有20种氨基酸和8种人体必需氨基酸,与人

体必需氨基酸的需求相吻合,易于人体吸收利用,具有改善餐后血糖波动^[20]、降低血液中胆固醇和甘油三酯水平^[21]、促进乳酸菌、双歧杆菌等益生菌增殖的作用^[22],是无乳糖婴幼儿配方奶粉常用的蛋白质原料之一。由图3可知,随着大豆分离蛋白添加量的增加代餐粉的感官评分呈现先上升后下降的趋势,在大豆分离蛋白添加量为0.8 g时达到最高。当大豆分离蛋白添加量超过0.8 g时,代餐粉冲调后的颗粒明显增多,推测原因可能是代餐粉中的大豆分离蛋白被迅速吸水膨胀的魔芋精粉包裹而不能充分溶解分散开来,影响了代餐粉溶液的冲调性。

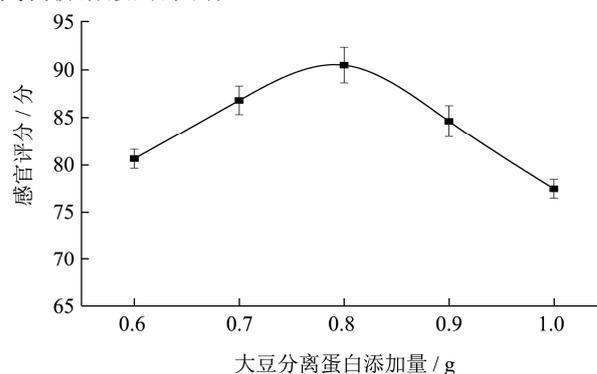


图3 大豆分离蛋白添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.3 The effect of soy protein isolate dosage on sensory score of meal replacement

2.1.4 植物甾醇酯对代餐粉感官评分的影响

植物甾醇酯具有人体皮肤固醇类似的结构,是降低血脂和预防心脑血管疾病常用的功能食品原料^[23]。植物甾醇酯具有降低胆固醇、抗动脉粥样硬化^[24]、提高免疫力、抗氧化等^[25]作用。由图4可以看出,随着植物甾醇酯添加量的增加代餐粉的感官评分呈现先升高后下降的趋势,当植物甾醇酯添加量为0.3 g时代餐粉的冲调性和冲调后溶液的稳定性最好,植物甾醇酯添加量超过0.3 g后发现冲调后溶液稳定性逐渐变差。因此,植物甾醇酯最佳添加量范围为0.1~0.6 g。

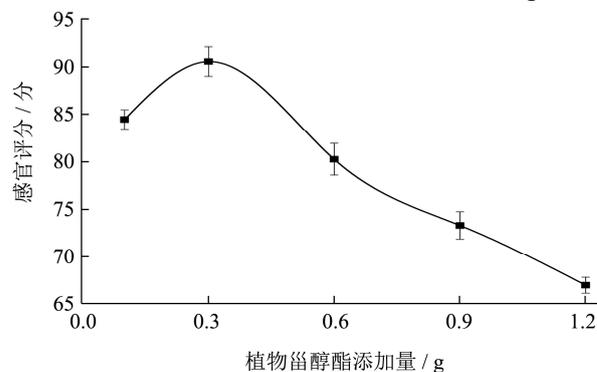


图4 植物甾醇酯添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.4 The effect of phytosterol esters dosage on sensory score of meal replacement

2.1.5 木糖醇对代餐粉感官评分的影响

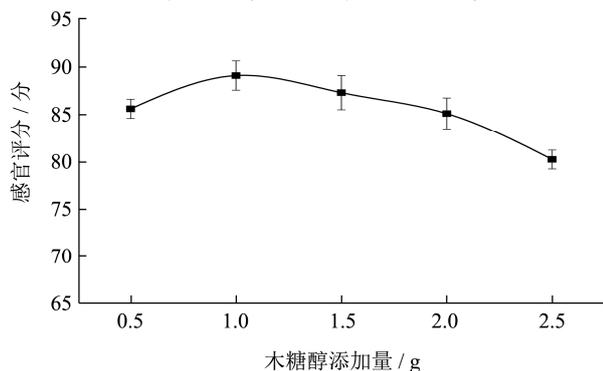


图5 木糖醇添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.5 The effect of xylitol dosage on sensory score of meal replacement

木糖醇是一种天然的功能性甜味剂,其甜度约为蔗糖的1.2倍,其代谢不需要胰岛素参与,不升高血糖,是一种低热量的肥胖及糖尿病人可食用的食品原料^[26,27]。木糖醇添加量对代餐粉质量的感官评分如图5所示,随着木糖醇添加量的增加,代餐粉感官评分逐渐增加,但当添加量增至1.0g后其评分呈现逐渐下降趋势。推测其原因可能是木糖醇在溶解时吸收热量,导致口中产生的清凉感影响了代餐粉的感官评分。

2.1.6 香芋粉对代餐粉感官评分的影响

香芋粉是通过提取香芋中的有效营养成分而制成的,具有香芋天然的香气香味,是一种常用于固体饮料的食品原料。由图6可知,随着香芋粉添加量的增加代餐粉质量感官评分呈现先升高后下降的趋势。当香芋粉添加量为0.4g时,代餐粉的香气香味不足,当添加量为1.2g时代餐粉的香芋滋气味正常,口感纯正,评分最高。因此,香芋粉的最佳添加量范围为1.0~1.4g。

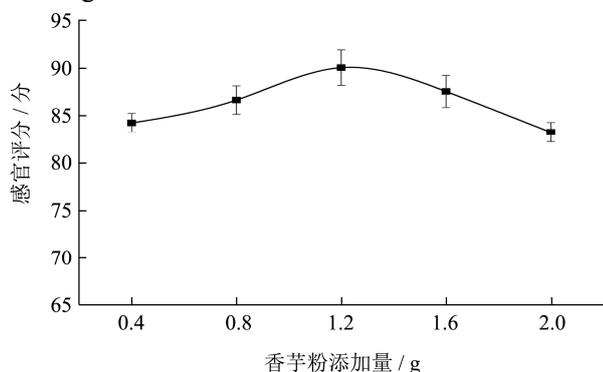


图6 香芋粉添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.6 The effect of taro powder dosage on sensory score of meal replacement

2.1.7 三氯蔗糖对代餐粉感官评分的影响

三氯蔗糖甜度为蔗糖的600倍,甜味纯正,不参与人体代谢,几乎不提热量,是一种可用于肥胖症、

糖尿病等特殊人群食品的食品原料^[28]。三氯蔗糖与木糖醇具有甜度互补的作用,两者一起使用具有协调增效的作用,木糖醇能掩盖三氯蔗糖的后苦味,使甜味自然^[29]。三氯蔗糖对代餐粉的感官评分如图7所示,随着三氯蔗糖添加量的增加代餐粉的感官评分呈现先增加后降低的趋势。当三氯蔗糖添加量为0.0025g时,代餐粉冲调液口感偏淡;当添加量为0.005g时代餐粉甜度适中,口感自然;当添加量继续增加至0.0075g时,代餐粉冲调液甜腻,有苦味。所以三氯蔗糖的最适添加范围为0.004~0.006g。

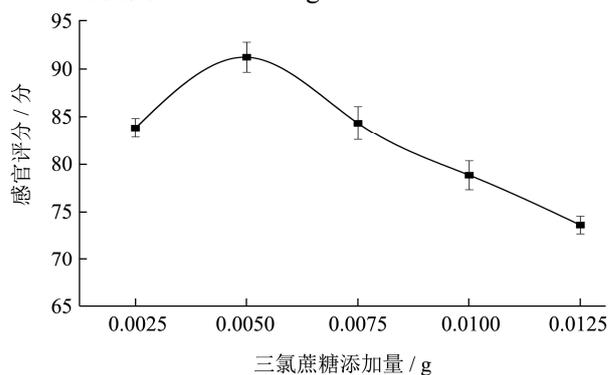


图7 三氯蔗糖添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.7 The effect of sucralose dosage on sensory score of meal replacement

2.2 Plackett-Burman 因素筛选试验

将代餐粉的7个因素采用Design-Expert 11.1.0.1软件进行Plackett-Burman试验设计,共12组试验,以代餐粉的感官评分为考察指标,见表5。对表5结果进行方差分析,当 p 值 <0.05 时表示该因素对代餐粉质量具有显著影响。由表6可知,对代餐粉质量具有显著影响的因素分别为A、C和D,且其影响大小为A魔芋精粉添加量 $>$ C大豆分离蛋白添加量 $>$ D植物甾醇酯添加量,因此选择A魔芋精粉添加量、C大豆分离蛋白添加量和D植物甾醇酯添加量3个因素进行最陡爬坡试验,进一步优化配方。

2.3 显著因素的爬坡试验

在Plackett-Burman试验的基础上,固定益生元组合8.0g、木糖醇1.0g、香芋粉1.2g、三氯蔗糖0.005g,选择魔芋精粉、大豆分离蛋白和植物甾醇酯等对代餐粉感官评分具有显著影响的因素进行最陡爬坡试验,其设计与结果如表7。根据表7试验结果可知,第2组代餐粉配方的感官评价最高,因此选择第2组为响应面优化的中心点,即魔芋精粉添加量3.5g、大豆分离蛋白添加量0.75g和植物甾醇酯添加量0.15g。

表 5 Plackett-Burman 试验设计与结果

Table 5 Experimental design and results of Plackett-Burman design

试验号	A(魔芋精粉 添加量/g)	B(益生元组合 添加量/g)	C(大豆分离蛋白 添加量/g)	D(植物甾醇酯 添加量/g)	E(木糖醇 添加量/g)	F(香芋粉 添加量/g)	G(三氯蔗糖 添加量/g)	感官评分 /分
1	5	10	0.7	0.6	1.50	1.4	0.004	76.19
2	3	10	0.9	0.1	1.50	1.4	0.006	82.38
3	5	8	0.9	0.6	0.75	1.4	0.006	65.21
4	3	10	0.7	0.6	1.50	1.0	0.006	75.16
5	3	8	0.9	0.1	1.50	1.4	0.004	91.69
6	3	8	0.7	0.6	0.75	1.4	0.006	87.35
7	5	8	0.7	0.1	1.50	1.0	0.006	83.04
8	5	10	0.7	0.1	0.75	1.4	0.004	79.35
9	5	10	0.9	0.1	0.75	1.0	0.006	63.19
10	3	10	0.9	0.6	0.75	1.0	0.004	73.85
11	5	8	0.9	0.6	1.50	1.0	0.004	70.80
12	3	8	0.7	0.1	0.75	1.0	0.004	85.88

表 6 Plackett-Burman 试验设计效应分析

Table 6 Results of statistical analysis for the Plackett-Burman design

来源	平方和	自由度	均方和	F	p	显著性
模型	791.46	7	113.07	8.24	0.030	*
A-魔芋精粉	285.48	1	285.48	20.80	0.010	*
B-益生元组合	95.49	1	95.49	6.96	0.058	
C-大豆分离蛋白	132.34	1	132.34	9.64	0.036	*
D-植物甾醇酯	113.90	1	113.90	8.30	0.045	*
E-木糖醇	49.74	1	49.74	3.62	0.13	
F-香芋粉	76.26	1	76.26	5.56	0.078	
G-三氯蔗糖	38.27	1	38.27	2.79	0.170	
残差	54.90	4	13.73			
总和	846.36	11				

注: *表示结果显著 ($p < 0.05$)。

表 7 显著性因素最陡爬坡试验设计与结果

Table 7 Experimental design and results of steepest ascent path experiment

试验号	A(魔芋精粉添加量/g)	C(大豆分离蛋白添加量/g)	D(植物甾醇酯添加量/g)	感官评分/分
1	3.00	0.70	0.10	85.42
2	3.50	0.75	0.15	90.61
3	4.00	0.80	0.20	88.90
4	4.50	0.85	0.25	75.86
5	5.00	0.90	0.30	61.34

2.4 响应面法优化代餐粉配方

2.4.1 Box-Behnken 试验设计

在 Plackett-Burman 试验和最陡爬坡试验的基础上,利用 Design-Expert 11.1.0.1 软件进行 Box-Behnken 试验设计及结果如表 8 所示,响应面二次模型的方差分析如表 9 所示。对试验结果进行二次多元回归拟合

分析,得到回归方程: 感官评分 $R1=92.92-2.27 \times X_1 + 0.5863 \times X_2 + 3.24 \times X_3 - 1.86 \times X_1 X_2 - 3.33 \times X_1 X_3 - 0.855 \times X_2 X_3 - 10.24 \times X_1^2 - 9.29 \times X_2^2 - 6.52 \times X_3^2$

由表 9 可知,模型对试验的拟合度良好, $p < 0.0001$, 达到极为显著水平,表明模型对试验拟合度较好。失拟项 p 值为 0.128, 大于 0.05, 失拟项检验不显著,说明残差均有随机误差引起的。模型的复决

定系数 $R^2=0.9983$, 表明该模型拟合度较好, 校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.9962$, 表明该模型可以解释 99.62% 响应的变化和预测。

表 8 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 8 Experimental design and results of Box-Behnken design

试验号	A(魔芋精粉添加量/g)	C(大豆分离蛋白添加量/g)	D(植物甾醇酯添加量/g)	感官评分/分
1	3.50	0.80	0.20	92.76
2	4.00	0.80	0.10	74.38
3	3.50	0.80	0.20	92.45
4	3.50	0.70	0.30	80.89
5	3.00	0.80	0.30	84.61
6	4.00	0.70	0.20	72.56
7	3.50	0.70	0.10	71.87
8	3.50	0.80	0.20	93.44
9	4.00	0.80	0.30	73.36
10	3.50	0.80	0.20	93.15
11	3.50	0.90	0.30	80.64
12	3.00	0.80	0.10	72.29
13	4.00	0.90	0.20	69.73
14	3.00	0.70	0.20	73.34
15	3.00	0.90	0.20	77.94
16	3.50	0.80	0.20	92.79
17	3.50	0.90	0.10	75.04

表 9 二次模型的方差分析

Table 9 Analysis of variance (ANOVA) for Quadratic model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	1283.09	9	142.57	467.78	<0.0001	**
A	41.18	1	41.18	135.11	<0.0001	**
C	2.75	1	2.75	9.02	0.020	*
D	83.98	1	83.98	275.55	<0.0001	**
AC	13.80	1	13.80	45.28	0.0003	**
AD	44.49	1	44.49	145.97	<0.0001	**
CD	2.92	1	2.92	9.59	0.017	*
A ²	441.31	1	441.31	1448.01	<0.0001	**
C ²	363.21	1	363.21	1191.74	<0.0001	**
D ²	179.00	1	179.00	587.34	<0.0001	**
残差	2.13	7	0.30			
失拟项	1.55	3	0.52	3.52	0.13	
误差	0.58	4	0.15			
总变异	1285.22	16				

注: **表示结果极为显著 ($p<0.01$); *表示结果显著 ($p<0.05$)。

2.4.2 响应面分析

采用 Design-Expert 11.1.0.1 软件以代餐粉的感官评分为指标对响应面结果进行分析, 得到了各因素对代餐粉感官评价的等高线图和响应图, 见图 8。如图 8a、b 所示, 魔芋精粉和大豆分离蛋白对代餐粉的感官评价

的交互作用近似圆形, 且 $p=0.0003$, 说明魔芋精粉和大豆分离蛋白对代餐粉的感官评价具有显著作用。如图 8c、d 所示, 魔芋精粉和植物甾醇酯对代餐粉的感官评价的交互作用近似椭圆形, 且 $p<0.0001$, 说明魔芋精粉和植物甾醇酯对代餐粉的感官评价具有显著作

用。如图 8e、8f 所示，植物甾醇酯和大豆分离蛋白对代餐粉的感官评价的交互作用近似椭圆形，且 $p=0.017$ ，说明植物甾醇酯和大豆分离蛋白对代餐粉的感官评价具有显著作用。由图 8 可知，魔芋精粉、大豆分离蛋白和植物甾醇酯对代餐粉的感官评分的交互作用显著。

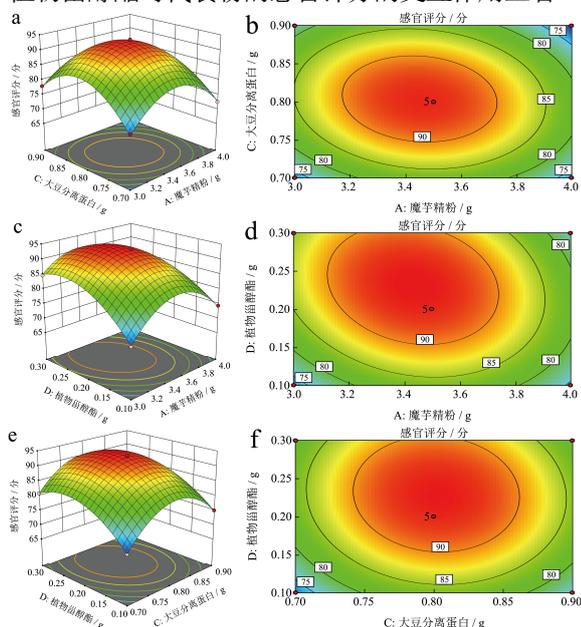


图 8 各因素交互作用对代餐粉感官评分影响的响应面和等高线

Fig.8 Response surface and contour plots showing the mutual effects between candidate variables and the sensory score of meal replacement

2.5 验证试验

以代餐粉的感官评分为指标，通过响应面优化后的代餐粉配方为魔芋精粉添加量 3.42 g、大豆分离蛋白 0.80 g、植物甾醇酯 0.23 g，预测感官评分为 93.58。代餐粉配方为魔芋精粉添加量 3.42 g、大豆分离蛋白

0.80 g、植物甾醇酯 0.23 g、益生元组合 8.00 g（菊粉 2.50 g、低聚果糖 2.50 g、低聚异麦芽糖 3.00 g）、木糖醇 1.00 g、香芋粉 1.20 g、三氯蔗糖 0.005 g，此配方的实际感官评分为 93.16 ± 0.73 ，与预测值基本一致，表明通过响应面法优化的代餐粉配方具有较好的重复性，可作为代餐粉的最佳配方。

2.6 代餐粉质量评价

2.6.1 代餐粉理化指标及微生物检测

代餐粉的各理化指标及微生物检测均按照国家食品安全相关标准进行了检测，结果如表 10 所示。其中代餐粉的主要功效成分葡甘露聚糖含量为 30.0%，与代餐粉中魔芋精粉（主要成分葡甘露聚糖）添加量基本一致，蛋白质、水分、铅、砷及微生物等指标均符合固体饮料和食品微生物指标的各项要求。

2.6.2 代餐粉营养成分分析

参考 GB 28050-2011《预包装食品营养标签通则》、中国食物成分表和厂家提供各原料的营养成分值，对代餐粉中的物料所含成分进行计算并绘制代餐粉的营养成分表（见表 11）。本代餐粉能量值 965 kJ/100 g，每次食用 15 g 仅 145 kJ 热量，蛋白质含量 4.8 g/100 g，严格控制脂肪含量仅为 0.9 g/100 g。本代餐粉中原料魔芋粉、益生元中膳食纤维含量均较高，不仅降低了代餐粉的能量值，还能增加膳食纤维的含量。与都阳等^[30]关于国内市场主要代餐食品的膳食纤维分布的结果对比发现，国内市场上每份代餐食品提供膳食纤维平均为 5 g，而本代餐粉每份提供膳食纤维 10 g（15 g/份），说明本代餐粉具有高膳食纤维的特点。通过食用本代餐粉，在满足消费者基本营养需求的同时，提供饱腹感，减少其他食物的摄入量，益生元改善肠道微环境，从而达到一定的控制体重的效果。

表 10 代餐粉质量评价结果

Table 10 Quality evaluation of meal replacement

编号	检验项目	检测结果	检验依据	指标要求
1	葡甘露聚糖, %	30.0±0.53	GB/T 18104-2000	-
2	蛋白质, g/100 g	4.80±0.31	GB 5009.5-2016	≥0.7
3	水分, g/100 g	4.96±0.33	GB 5009.3-2016 (第一法)	≤7.0
4	铅(以 Pb 计), mg/kg	未检出 (<0.05)	GB 5009.12 (第二法)	≤2.0
5	总砷(以 As 计), mg/kg	0.020±0.01	GB 5009.11-2014 (第一法)	≤1.0
6	菌落总数, CFU/g	<10, <10, <10, <10, <10	GB 4789.2-2016	≤10 ⁴
7	大肠菌群, CFU/g	<10, <10, <10, <10, <10	GB 4789.4-2016 (第二法)	≤100
8	霉菌, CFU/g	<10	GB 4789.15-2016	≤50
9	沙门氏菌, CFU/g	未检出	GB 4789.4-2016	≤0/25 g
	金黄色葡萄球菌, CFU/g	<10, <10, <10, <10, <10	GB 4789.10-2016 (第二法)	≤0/25 g

表 11 代餐粉营养成分

Table 11 Nutrition composition of meal replacement

项目	每 100 g	NRV%
能量/kJ	965	11
蛋白质/g	4.8	8
脂肪/g	0.9	2
碳水化合物/g	16.9	6
膳食纤维/g	69.5	278
钠/mg	84	4

2.6.3 冲调性测定

取 15 g 代餐粉, 用 400 mL 50 °C 左右温水冲调, 边冲边搅拌, 50±6 s 可以搅拌均匀, 无颗粒、无结块。

3 结论

本试验利用魔芋精粉、大豆分离蛋白、植物甾醇酯、益生元组合(菊粉、低聚果糖、低聚异麦芽糖)、木糖醇、香芋粉和三氯蔗糖研发了一款富含益生元的且具饱腹感的代餐粉。通过单因素试验和 Plackett-Burman 试验确定了对代餐粉具有显著影响的因素为魔芋精粉、大豆分离蛋白和植物甾醇酯, 进一步根据最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验优化代餐粉配方显著因素的添加量分别为魔芋精粉 3.42 g、大豆分离蛋白 0.80 g 和植物甾醇酯 0.23 g。最终确定代餐粉的配方为魔芋精粉添加量 3.42 g、大豆分离蛋白 0.80 g、植物甾醇酯 0.23 g、益生元组合 8.00 g(菊粉 2.50 g、低聚果糖 2.50 g、低聚异麦芽糖 3.00 g)、木糖醇 1.00 g、香芋粉 1.20 g、三氯蔗糖 0.005 g, 该配方代餐粉冲调性较好、无颗粒, 色泽均匀一致, 口感细腻、黏度适中、味道纯正, 气味协调, 此时感官评价得分为 93.16 与预测值 93.58 基本一致。通过对代餐粉进行质量评价证实了该代餐粉质量可靠, 各项成分实际检测量与添加量基本一致, 各项指标均符合国家标准。

参考文献

- [1] TCNSS 002-2019,代餐食品[S]
TCNSS 002-2019, Meal Replacement Food [S]
- [2] Pearson-Stuttard J, Zhou B, Kontis V, et al. Worldwide burden of cancer attributable to diabetes and high body-mass index: a comparative risk assessment [J]. *Lancet Diabetes & Endocrinology*, 2018, 6(6): E6-E15
- [3] Saltiel A R, Olefsky J M. Inflammatory mechanisms linking obesity and metabolic disease [J]. *The Journal of Clinical Investigation*, 2017, 127(1): 1-4
- [4] 邓雨露,欧子豪,彭永正.米色脂肪细胞的诱导因子-抗肥胖的新策略[J].实用医学杂志,2017,33(19):3162-3165
- [5] DENG Lulu, OU Zihao, PENG Yongzheng. Inducible factors of beige adipocytes - a new strategy for anti-obesity [J]. *The Journal of Practical Medicine*, 2017, 33(19): 3162-3165
- [6] Huazano-Garcia A, Shin H, Lopez M G. Modulation of gut microbiota of overweight mice by agavins and their association with body weight loss [J]. *Nutrients*, 2017, 9(9): 10.3390
- [7] 王瑶,宁杰,宋庆贺,等.响应面法优化魔芋葡甘露聚糖制备工艺及其理化性质分析[J].食品研究与开发,2020,41(18): 154-161
- [8] WANG Yao, NING Jie, SONG Qinghe, et al. Optimization of preparation of konjac glucomannan from *Amorphophallus konjac* by response surface methodology and its physicochemical properties [J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(18): 154-161
- [9] Furusawa Y, Obata Y, Fukuda S, et al. Commensal microbe-derived butyrate induces the differentiation of colonic regulatory T cells [J]. *Nature*, 2013, 504(7480): 446-450
- [10] Brahe L K, Astrup A, Larsen L H. Can we prevent obesity-related metabolic diseases by dietary modulation of the gut microbiota? [J]. *Advances in Nutrition (Bethesda, Md.)*, 2016, 7(1): 90-101
- [11] Parnell J A, Reimer R A. Weight loss during oligofructose supplementation is associated with decreased ghrelin and increased peptide YY in overweight and obese adults [J]. *Am J Clin Nutr*, 2009, 89(6): 1751-1759
- [12] Neyrinck A M, Schüppel V L, Lockett T, et al. Microbiome and metabolic disorders related to obesity: which lessons to learn from experimental models? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 57: 256-264
- [13] Dahiya D K, Renuka, Puniya M, et al. Gut microbiota modulation and its relationship with obesity using prebiotic fibers and probiotics: a review [J]. *Front Microbiol*, 2017, 8: 563
- [14] Sun L, Ma L, Ma Y, et al. Insights into the role of gut microbiota in obesity: pathogenesis, mechanisms, and therapeutic perspectives [J]. *Protein Cell*, 2018, 9(5): 397-403
- [15] Jumpertz R, Le D S, Turnbaugh P J, et al. Energy-balance studies reveal associations between gut microbes, caloric load, and nutrient absorption in humans [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2011, 94(1): 58-65
- [16] Reilly S M, Saltiel A R. Adapting to obesity with adipose tissue inflammation [J]. *Nature Reviews. Endocrinology*, 2017, 13(11): 633-643

- [15] Salazar N, Dewulf E M, Neyrinck A M, et al. Inulin-type fructans modulate intestinal *Bifidobacterium* species populations and decrease fecal short-chain fatty acids in obese women [J]. *Clin Nutr*, 2015, 34(3): 501-507
- [16] Kang Y, Li Y, Du Y, et al. Konjaku flour reduces obesity in mice by modulating the composition of the gut microbiota [J]. *Int J Obes (Lond)*, 2019, 43(8): 1631-1643
- [17] 康永波. 魔芋葡甘露聚糖通过调控肠道微生物治疗肥胖的机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018
- KANG Yongbo. Mechanism of konjac glucomannan treating obesity by regulating gut microbiota [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018
- [18] Gibson G R, Hutkins R, Sanders M E, et al. Expert consensus document: the international scientific association for probiotics and prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics [J]. *Nature Reviews. Gastroenterology & Hepatology*, 2017, 14(8): 491-502
- [19] 黄国平, 孙春风, 陈慧卿, 等. 大豆分离蛋白提取与性能改善工艺研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(17): 398-404
- HUANG Guoping, SUN Chunfeng, Chen Huiqing, et al. A review of recent advance on extraction technology and performance improving technology of soybean protein isolate [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(17): 398-404
- [20] Huang Z, Wang Y, Shafer R, et al. Glycemic effects following the consumption of mixed soy protein isolate and alginate beverages in healthy adults [J]. *Food Funct*, 2019, 10(3): 1718-1725
- [21] Nagao K, Matsumoto A, Kai S, et al. Soy protein isolate suppresses lipodystrophy-induced hepatic lipid accumulation in model mice [J]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(2): 161-169
- [22] 杨晓婉, 张娜, 李雪霞, 等. 大豆蛋白及其水解物在乳粉中的应用及研究进展[J]. *中国乳品工业*, 2018, 46(4): 31-34
- YANG Xiaowan, ZHANG Na, LI Xuexia, et al. Application and research progress of soybean protein and its hydrolysate in milk powder [J]. *China Dairy Industry*, 2018, 46(4): 31-34
- [23] 管慧, 何江, 廖沙, 等. 植物甾醇酯低脂奶粉对 6~12 岁肥胖儿童血脂水平影响的研究[J]. *中国妇幼保健*, 2015, 30(27): 4639-4640
- GUAN Hui, HE Jiang, LIAO Sha, et al. Study on the effect of vegapure plant sterol ester low-fat milk powder on blood lipids levels of obese children aged 6-12 years old [J]. *Maternal and Child Health Care of China*, 2015, 30(27): 4639-4640
- [24] 张蕾. 植物甾醇及制品降心脑血管疾病风险的功能性评价[D]. 天津: 天津商业大学, 2014
- ZHANG Lei. Phytosterol and its products reduced the risk of cardiovascular disease by functional evaluations [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014
- [25] Ghaedi E, Varkaneh H K, Rahmani J, et al. Possible anti-obesity effects of phytosterols and phytostanols supplementation in humans: a systematic review and dose-response meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Phytother Res*, 2019, 33(5): 1246-1257
- [26] Livesey G. Health potential of polyols as sugar replacers, with emphasis on low glycaemic properties [J]. *Nutr Res Rev*, 2003, 16(2): 163-191
- [27] 袁蒲, 张书芳, 詹瑄, 等. 降血糖功能食品的研发进展[J]. *糖尿病新世界*, 2017, 20(20): 188-189
- YUAN Pu, ZHANG Shufang, ZHAN Xuan, et al. Progress in research and development of hypoglycemic functional foods [J]. *Diabetes New World*, 2017, 20(20): 188-189
- [28] 姜彬, 冯志彪. 甜味剂研究进展[J]. *山西食品工业*, 2005, 3: 16-19
- JIANG Bin, FENG Zhibiao. Research progress of sweeteners [J]. *Shanxi Food Industry*, 2005, 3: 16-19
- [29] 曹承旭, 武俊瑞, 乌日娜. 几种常用的甜味剂对肠道微生物的调节机制[J]. *微生物学报*, 2018, 58(11): 1979-1988
- CAO Chengxu, WU Junrui, WU Ri-na. Regulatory mechanism and research progress of several common sweeteners on intestinal microbes [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2018, 58(11): 1979-1988
- [30] 都阳, 张婧婕, 何晓叶, 等. 双蛋白营养代餐粉的配制及其品质特性分析[J/OL]. *食品工业科技*: 1-13[2021-08-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120027>
- DU Yang, ZHANG Jingjie, HE Xiaoye, et al. Composition and quality characteristics of dual-protein nutrition meal replacement powder [J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*: 1-13[2021-08-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120027>