

## 挤压膨化结合微粉碎制备高纤维谷物代餐粉及其品质评价

霍 瑞, 张美莉\*, 张园园, 白雪, 张亚琨, 郭新月

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院 呼和浩特 010018)

**摘要** 以燕麦-玉米-魔芋挤压膨化混粉和燕麦麸粉为主要原料,添加脱脂乳粉、葛根全粉、南瓜粉等辅料,制备一种高膳食纤维代餐粉。以感官评分和分散性指数为指标,在单因素实验基础上进行响应面优化,确定代餐粉的最佳工艺配方为:挤压膨化混粉 27%、燕麦麸粉 33%、脱脂乳粉 20%、南瓜粉 9%,在此条件下,代餐粉感官评分 76.78 分,分散性指数 99.03%。测得产品总膳食纤维含量 19.31%,可溶性膳食纤维 11.42%,估计血糖生成指数(eGI)73.41,属于中 GI 食物。

**关键词** 响应面法;代餐粉;膳食纤维;体外消化率

**文章编号** 1009-7848(2022)11-0228-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.024

代餐粉是一种或多种原辅料按照不同比例及工艺调配而成的冲调类产品,具有食用方便和改善人体健康的功能<sup>[1]</sup>。近年来,谷物代餐粉因低热量、营养全面和改善肥胖作用而成为研究热点,其中以燕麦为主要原料的代餐粉因具有降血糖、血脂功效,良好溶解性和特殊的风味等特点而被熟知<sup>[2-3]</sup>,具有良好的应用前景。

已有研究结果显示,燕麦、玉米和魔芋粉经挤压膨化处理后慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加,体外消化速率明显降低。Wang 等<sup>[4]</sup>将紫薯粉与大米粉共挤压,结果显示:该膨化粉比单纯膨化大米粉的 eGI 值低,淀粉晶型由典型的 A 型变为 V 型;Xie 等<sup>[5]</sup>探讨了  $\beta$ -葡聚糖及各种热处理方法对大麦淀粉消化性的影响,结果发现  $\beta$ -葡聚糖对淀粉消化有抑制作用,可能是由于淀粉-蛋白质- $\beta$ -葡聚糖复合物的包封,与上述研究结果一致。本研究中魔芋粉含有大量葡甘露聚糖,具有多种生物活性<sup>[6]</sup>,在食品中应用广泛。燕麦麸粉含有  $\beta$ -葡聚糖,不仅具有显著降糖效果<sup>[7]</sup>,也具有替代食品增稠剂和稳定剂的潜力,燕麦麸粉是本研究中代餐粉的主要物质,有研究证明,其经微粉碎后水溶性、吸水性和可溶性膳食纤维溶出率均提高<sup>[8]</sup>。南瓜粉具有丰富的微量元素,其中的钴含量相对丰

富,在体内代谢中可以扩张血管,降低血压,南瓜果胶在分子结构上表现出广泛的多样性,有助缓解淀粉酶的作用,延缓肠道对糖类物质的吸收<sup>[9]</sup>。葛根中富含对人体有益的葛根素和黄酮类物质,而葛根全粉是近年来加工的新产品,与葛根淀粉相比,葛根全粉充分保留了葛根中的各种有效成分,而且加工技术简单,原料利用率高,产品成本较低<sup>[10]</sup>,将上述原料混合制备代餐粉符合健康减肥的理念。本试验采用响应面法确定最佳配比,研制一种色泽、口感及分散性均符合消费者需求的产品,也为开发多元化的燕麦产品提供参考。

### 1 材料与amp;方法

#### 1.1 材料与试剂

燕麦粉,内蒙古伊泰生态农业有限公司;燕麦麸皮粗粉,内蒙古西贝汇通农业科技有限公司;马齿型玉米,内蒙古农业大学玉米研究中心;J08 魔芋粉,湖北强森魔芋科技有限公司;脱脂乳粉,新西兰恒天然集团;南瓜粉,兴化市绿帅食品有限公司;葛根全粉,平乐县乐瑶食品有限公司; $\alpha$ -淀粉酶,索莱宝生物科技有限公司;胃蛋白酶,美国 SIGMA 公司;3,5-二硝基水杨酸,国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.2 仪器与设备

PLS 新型超微粉碎机,济南普莱申机械设备有限公司;S32 试验型双螺杆挤出机,山东济南赛信有限公司;G8023CTL-K3 微波炉,格兰仕微波炉电器有限公司;UV2300 II 双光束紫外-可见分

收稿日期:2021-11-02

基金项目:内蒙古科技厅重点项目(2020GG0064);内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0002)

第一作者:霍瑞,男,硕士生

通信作者:张美莉 E-mail: zhangmeili22@sina.com

光光度计,上海天美科学仪器有限公司;PEN3型便携式电子鼻传感器,德国Airsense公司;XL-20B1000克密封型摇晃式微粉碎机,广州市旭朗机械设备有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 燕麦-玉米混粉及添加魔芋粉后的膨化粉制备流程 将燕麦粉和粉碎后的玉米分别过60目筛,以质量比6:4简单混合,加入5%魔芋粉后充分混匀,加水至物料水分含量至25%后再混合均匀,分批取500g放入双螺杆挤压机进料口,条件设置为:挤出温度180℃,进料速度15Hz,螺杆转速16Hz。

1.3.2 燕麦麸熟粉制备工艺流程 称量200g燕麦麸粗粉放入超微粉碎机进行粉碎,设置粉碎时

间5min,粉碎频率50Hz<sup>[11]</sup>,之后过120目筛,放入微波炉熟化,微波频率800W,时间100s。

1.3.3 单因素实验 固定挤压膨化混粉的添加量为3.0g,燕麦麸粉添加量4.0g,脱脂乳粉添加量2.5g,南瓜粉添加量1.0g,其它辅料共1.1g。分别选择挤压膨化混粉添加量、燕麦麸粉添加量、脱脂乳粉添加量和南瓜粉添加量等因素进行单因素实验,试验中的各因素水平分别为:挤压膨化混粉添加量为2.0,2.5,3.0,3.5,4.0g;燕麦麸粉添加量为1.0,2.0,3.0,4.0,5.0g;脱脂乳粉添加量1.5,2.0,2.5,3.0,3.5g;南瓜粉添加量0.4,0.7,1.0,1.3,1.6g。将所有原料混匀,加70℃的温水搅拌均匀后对产品进行感官评定,评分标准如表1。

表1 高纤维谷物代餐粉感官评分标准

Table 1 Sensory scoring standards for high-fiber cereal meal replacement powder

项目	评分标准
色泽(10分)	色泽均匀,7~10分 光泽度差,颜色稍不均匀,4~6分 光泽度差,颜色过深或过浅,1~3分
滋味和气味(10分)	有燕麦、玉米和奶粉香气,香味浓郁,7~10分 燕麦、玉米和奶粉香气较淡,香味不明显,4~6分 香味过浓或过淡,或有其它气味,1~3分
组织形态(10分)	组织均匀,无明显颗粒物,无结块,7~10分 组织均匀,但不够细腻,有轻微结块,4~6分 组织不均匀,有明显颗粒物,结块较多,1~3分
黏性(20分)	黏度适当,不稀不稠,14~20分 黏度适当,黏连性好,7~13分 黏度过稠或过稀,1~6分
溶解性(30分)	冲调后成糊状,不分层,溶解性良好,21~30分 冲调后成糊状,有轻微分层,11~20分 冲调后成糊状,有明显分层,1~10分
口感(20分)	入口即咽,无沙粒感,15~20分 轻微沙粒感,7~14分 沙粒感明显,1~6分

1.3.4 分散性指数测定 参照吴森等<sup>[12]</sup>的方法略作修改。称量10g样品放入烧杯中,量取一定温度下的70mL蒸馏水倒入烧杯,以一定速度搅拌1min后静置3min,使用已经称重的20目筛子过滤代餐粉溶液,并用蒸馏水缓慢冲洗结块物质,冲洗后将带有结块物质的筛子放入105℃烘箱恒温干燥至恒重。样品分散性指数按照公式(1)计算。

$$\text{分散性指数}(\%) = 1 - \frac{a}{b(1-w)} \times 100 \quad (1)$$

式中: $a$ ——结块物质的质量,g; $b$ ——样品质量,g; $w$ ——样品水分含量,%。

1.3.5 Box-Behnken 试验设计 在单因素实验的基础上,选取4个因素为自变量,分别为A:挤压膨化混粉添加量、B:燕麦麸粉添加量、C:脱脂乳粉

表2 分散性指数评判标准

Table 2 Evaluation criteria of dispersion index

分散性指数	≥95%	90%~95%	80%~90%	≤80%
评价	很好	好	较好	差

表3 响应面试验因子水平及编号

Table 3 Response surface test factor levels and codes

水平	因子			
	挤压膨化 混粉添加 量(A)/%	燕麦麸粉 添加量 (B)/%	脱脂乳粉 添加量 (C)/%	南瓜粉添 加量(D)/ %
	-1	25	30	20
0	30	40	25	10
1	35	50	30	13

添加量、D:南瓜粉添加量;以感官评分和分散性指数为评价价值,根据响应面试验中4因素3水平的设计原理,进行优化试验,设计结果见表3。

1.3.6 电子鼻测定 参照孙学颖等<sup>[13]</sup>的方法稍作修改。称量3g代餐粉放入10mL顶空瓶中,在80℃下水浴20min,取出顶空瓶后静置5min,在室温环境下用PEN3型便携式电子鼻传感器对样品进行测定。设置电子鼻条件为:初始进样流量300μL/min,取样间隔时间1s,清洗时间120s,检测时间120s,零点修剪时间1s,每组样品做3次平行重复。

1.3.7 淀粉体外消化率测定 参照Goni等<sup>[14]</sup>的方法,称量50mg粉末状样品,加入10mL HCl-KCl缓冲液(pH=1.5)和0.2mL胃蛋白酶(0.1g/mL, HCl-KCl缓冲液),加入磁力搅拌子后在40℃水浴下振荡1h。用0.5mol/L乙酸盐缓冲液(pH=6.5)定容至25mL,使胃蛋白酶失活。之后加入5mL α-淀粉酶,在37℃条件下水浴振荡,搅拌速率为160r/min,在水解过程中,分别在0,20,30,60,90,120,150,180min时取出1mL样品消化液,立刻加入4倍体积的无水乙醇灭酶。之后使用3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定样品中总还原糖的含量并转化成葡萄糖的物质的量浓度。以水解时间为横坐标,淀粉水解速率为纵坐标绘制水解曲线。计算各个样品在0~180min期间淀粉水解曲线下的面积(AUC样品和AUC白面包),得出样品淀粉水解指数(Hydrolysis index, HI)。样品的

估计血糖生成指数(Estimated glycemic index, e-GI)按照公式(2)和(3)计算。

$$HI(\%) = \frac{AUC_{\text{样品}}}{AUC_{\text{白面包}}} \times 100 \quad (2)$$

$$eGI = 8.1981 + 0.862 \times HI \quad (3)$$

1.3.8 数据处理 所有试验重复3次,结果计算表示为平均值±标准差。采用Design Expert 8.0.6进行响应面数据分析,数据的显著性分析采用SPSS 25.0软件,使用Origin 2018软件对数据进行统计分析并绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 挤压膨化混粉添加量对代餐粉感官评分的影响 由图1可知,随着挤压膨化混粉添加量的增加,感官评分先上升后下降,在添加量为3g时达到最高。挤压膨化混粉的添加主要影响溶解性,由于挤压膨化处理通过高温挤压和高剪切力作用形成了稳定的挤压复合物<sup>[15]</sup>,导致结构致密不易被消化,水溶性也因此下降;魔芋粉是一种水溶性膳食纤维,随着混粉添加量的增多,吸水性明显增加。综合考虑下,选择挤压膨化混粉添加量为2.5~3.5g为响应面试验设计因素水平。

2.1.2 燕麦麸粉添加量对代餐粉感官评分的影响 由图2可知,随着燕麦麸粉添加量的增加,感官评分先上升后下降,在添加量为4g时达到最高。燕麦麸粉的添加主要影响溶液的黏性及溶解性,经过微粉碎后,燕麦麸粉的黏性和溶解性均得到提升,功能性物质也充分溶出<sup>[16]</sup>,其中β-葡聚糖不仅具有多种生物活性,在溶液稳定性上也发挥重要作用<sup>[17]</sup>。添加少量的燕麦麸粉使代餐粉溶液快速分层且黏度过稀,过量则会呈现黏度过稠的状态,因此选择燕麦麸粉添加量为3~5g为响应面试验设计因素水平。

### 2.1.3 脱脂乳粉添加量对代餐粉感官评分的影响

由图3可知,随着脱脂乳粉添加量的增加,感官评分呈现上升的趋势,在添加量为2.5g时达到最高。脱脂乳粉是本研究代餐粉中提供蛋白质的主要原料,感官方面主要影响口感、滋味和气味,提供特有的奶粉香气和较好的口感,对溶液的物理性质无明显影响,因此添加正常比例的脱脂乳粉

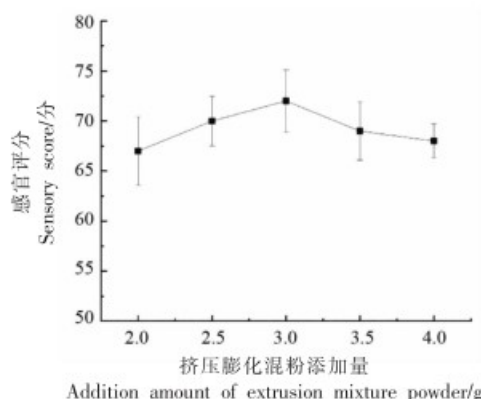


图 1 挤压膨化混粉添加量对代餐粉感官品质的影响

Fig.1 Effect of extrusion mixture powder addition amount on sensory quality of meal replacement powder

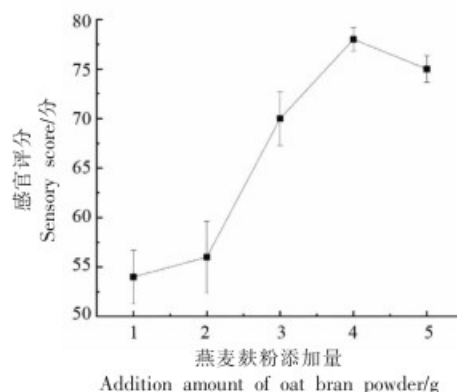


图 2 燕麦麸粉添加量对代餐粉感官品质的影响

Fig.2 The effect of oat bran powder addition amount on the sensory quality of meal replacement powder

均对感官评分影响较小, 以提供蛋白质为参考依据, 则选择脱脂乳粉添加量为 2~3 g 为响应面试验设计因素水平。

2.1.4 南瓜粉对代餐粉感官评分的影响 由图 4 可知, 随着南瓜粉添加量的增加, 感官评分呈现先上升后下降的趋势, 在添加量为 1.0 g 时达到最

高。南瓜粉主要影响色泽和滋味, 添加燕麦麸粉和脱脂乳粉后代餐粉溶液光泽度差, 颜色较浅, 而添加南瓜粉后的溶液色泽均匀、香气浓郁且有食欲感, 因此选择南瓜粉添加量为 0.7~1.3 g 为响应面试验设计因素水平。

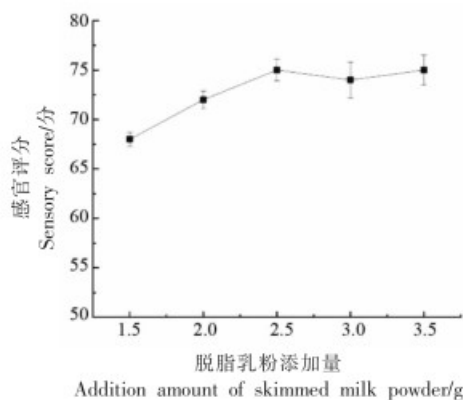


图 3 脱脂乳粉添加量对代餐粉感官品质的影响

Fig.3 The effect of skimmed milk powder addition amount on the sensory quality of meal replacement powder

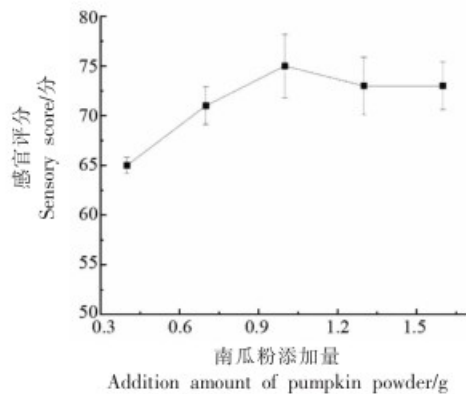


图 4 南瓜粉添加量对代餐粉感官品质的影响

Fig.4 The effect of pumpkin powder addition amount on the sensory quality of meal replacement powder

## 2.2 响应面试验结果与分析

2.2.1 Box-Behnken 试验试验设计及结果 根据四因素三水平的响应面设计选择试验点 29 个, 其中 24 个析因点, 5 个零点<sup>[18]</sup>, 结果见表 4。

2.2.2 回归模型的建立与方差分析 用 Design-Expert 对试验结果进行多元回归拟合、方差分析及显著性检验, 得到以高纤维谷物代餐粉感官评

分  $Y$  为目标函数的预测模型。

$$Y = 75.80 + 1.33A + 2.00B + 0.58C + 1.42D - 0.50AD + 0.25BC - 0.75BD - 1.23A^2 - 1.73B^2 - 0.86C^2 - 1.11D^2$$

同理, 得到以分散性指数  $Z$  为目标函数的预测模型。

$$Z = 98.86 + 0.66A - 0.37B - 0.18C + 0.092D -$$

$0.22AB+0.88AC+0.17AD-0.050BC+0.23BD+0.075CD-0.81A^2-0.43B^2-0.53C^2-0.11D^2$  对回归模型进行方差分析,结果如表5、表6所示。

表4 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 4 Box-Behnken test design and results

试验号	A	B	C	D	感官 评分/分	分散性 指数/%	试验号	A	B	C	D	感官 评分/分	分散性 指数/%
1	-1	-1	0	0	69	97.3	16	0	1	1	0	76	97.5
2	1	-1	0	0	72	98.9	17	-1	0	-1	0	73	97.9
3	-1	1	0	0	73	97.2	18	1	0	-1	0	74	97.4
4	1	1	0	0	76	97.9	19	-1	0	1	0	74	95.3
5	0	0	-1	-1	72	98.7	20	1	0	1	0	75	98.3
6	0	0	1	-1	73	98.2	21	0	-1	0	-1	69	98.4
7	0	0	-1	1	74	98.5	22	0	1	0	-1	75	97.3
8	0	0	1	1	75	98.3	23	0	-1	0	1	73	98.3
9	-1	0	0	-1	69	97.3	24	0	1	0	1	76	98.1
10	1	0	0	-1	74	98.5	25	0	0	0	0	76	99.2
11	-1	0	0	1	74	97.2	26	0	0	0	0	75	98.8
12	1	0	0	1	77	99.1	27	0	0	0	0	76	98.7
13	0	-1	-1	0	71	98.4	28	0	0	0	0	75	99.1
14	0	1	-1	0	74	97.5	29	0	0	0	0	77	98.5
15	0	-1	1	0	72	98.6							

表5 各因素感官评分交互作用及回归方程方差分析表

Table 5 Interaction of various factors in sensory rating and analysis of variance table of regression equation

方差信息	自由度	平方和	均方	F值	P值	显著性
模型	14	129.43	9.24	10.89	<0.0001	**
A	1	21.33	21.33	25.13	0.0002	**
B	1	48.00	48.00	56.55	<0.0001	**
C	1	4.08	4.08	4.81	0.0457	*
D	1	24.08	24.08	28.37	0.0001	**
AB	1	0.000	0.000	0.000	1.0000	-
AC	1	0.000	0.000	0.000	1.0000	-
AD	1	1.00	1.00	1.18	0.2961	-
BC	1	0.25	0.25	0.29	0.5959	-
BD	1	2.25	2.25	2.65	0.1258	-
CD	1	0.000	0.000	0.000	1.0000	-
A <sup>2</sup>	1	9.87	9.87	11.62	0.0042	**
B <sup>2</sup>	1	19.49	19.49	22.96	0.0003	**
C <sup>2</sup>	1	4.78	4.78	5.63	0.0325	*
D <sup>2</sup>	1	7.97	7.97	9.39	0.0084	-
残差	14	11.88	0.15			
失拟项	10	9.08	0.18	1.3	0.4316	-
纯误差	4	2.80	0.083			
总差	28	141.31				
R <sup>2</sup>		0.9159				
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>		0.8318				
CV		1.25				

注:“-”表示影响不显著( $P>0.05$ ),“\*”表示影响显著( $P<0.05$ ),“\*\*”表示影响极显著( $P<0.01$ )。

由表 5 可知, 由软件建立的感官评分回归模型  $P < 0.0001$ , 为极显著水平;  $R^2 = 0.9159$ ,  $R^2_{adj} = 0.8318$ , 说明试验模型可以较好反映响应值的变化, 失拟项 ( $P = 0.4316$ ) 不显著, 说明预测值和回归模型之间的拟合度较好<sup>[19-20]</sup>, 模型的一次项  $A$ 、 $B$ 、 $D$  影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $C$  影响显著 ( $P < 0.05$ ); 二

次项  $A^2$ 、 $B^2$  影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $C^2$  影响显著 ( $P < 0.05$ ),  $D^2$  影响不显著 ( $P > 0.05$ ); 交互项  $AB$ 、 $AC$ 、 $AD$ 、 $BC$ 、 $BD$ 、 $CD$  影响均不显著 ( $P > 0.05$ ), 由上述结论可知 4 个因素对感官评价影响的顺序为  $B > D > A > C$ , 即燕麦麸粉添加量 > 南瓜粉添加量 > 挤压膨化混粉添加量 > 脱脂乳粉添加量。

表 6 各因素分散性指数交互作用及回归方程方差分析表

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	14	16.59	1.19	7.65	0.0003	**
A	1	5.20	5.20	33.56	<0.0001	**
B	1	1.61	1.61	10.41	0.0061	**
C	1	0.40	0.40	2.60	0.1290	-
D	1	0.10	0.10	0.65	0.4334	-
AB	1	0.20	0.20	1.31	0.2722	-
AC	1	3.06	3.06	19.76	0.0006	**
AD	1	0.12	0.12	0.79	0.3890	-
BC	1	0.000	0.000	0.065	0.8032	-
BD	1	0.20	0.20	1.31	0.2722	-
CD	1	0.022	0.022	0.15	0.7089	-
$A^2$	1	4.29	4.29	27.69	0.0001	**
$B^2$	1	1.18	1.18	7.59	0.0155	*
$C^2$	1	1.79	1.79	11.57	0.0043	**
$D^2$	1	0.083	0.083	0.54	0.4755	-
残差	14	2.17	0.15			
失拟项	10	1.84	0.18	2.21	0.2307	-
纯误差	4	0.33	0.083			
总差	28	0.33				
$R^2$		0.8844				
$R^2_{adj}$		0.7687				
CV		0.40				

由表 6 可知, 形成的分散性指数回归模型  $P < 0.01$ , 为极显著水平,  $R^2 = 0.8844$ ,  $R^2_{adj} = 0.7687$ , 失拟项 ( $P = 0.2307$ ) 不显著, 说明预测值和回归模型之间的拟合度较好, 模型的一次项  $A$ 、 $B$  影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $C$ 、 $D$  影响不显著 ( $P > 0.05$ ); 二次项  $A^2$ 、 $C^2$  影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $B^2$  影响显著 ( $P < 0.05$ ),  $D^2$  影响不显著 ( $P > 0.05$ ); 交互项  $AC$  影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $AB$ 、 $AD$ 、 $BC$ 、 $BD$ 、 $CD$  影响均不显著 ( $P > 0.05$ ); 由上述分析可知 4 个因素对分散性指数影响的顺序为  $A > B > C > D$ , 即挤压膨化混粉添加量 > 燕麦麸粉添加量 > 脱脂乳粉添加量 > 南瓜粉添加量。

2.2.3 各因素的交互作用对代餐粉感官评分的影响 在响应面中, 形成的三维坡面越陡, 表明该变量的响应值越大; 在等高线图中, 图形越趋近椭圆

形, 说明因素的交互作用越显著<sup>[21]</sup>, 挤压膨化混粉添加量与燕麦麸粉添加量对代餐粉感官评分的影响如图 5 所示。

由图 5 可知, 挤压膨化混粉添加量与燕麦麸粉添加量的响应值和交互作用比较显著, 当挤压膨化混粉添加量固定时, 代餐粉的感官评价随燕麦麸粉添加量的增加呈先升高后降低趋势; 当燕麦麸粉添加量固定时, 代餐粉的感官评价随挤压膨化混粉添加量的增加呈先升高后降低趋势, 而等高线沿  $B$  轴的变化要比  $A$  轴密集, 说明燕麦麸粉添加量对代餐粉感官评价的影响要比挤压膨化混粉添加量大, 这与方差分析的结果相一致。

2.2.4 各因素的交互作用对代餐粉分散性指数的影响 如图 6 示, 挤压膨化混粉与燕麦麸粉的响

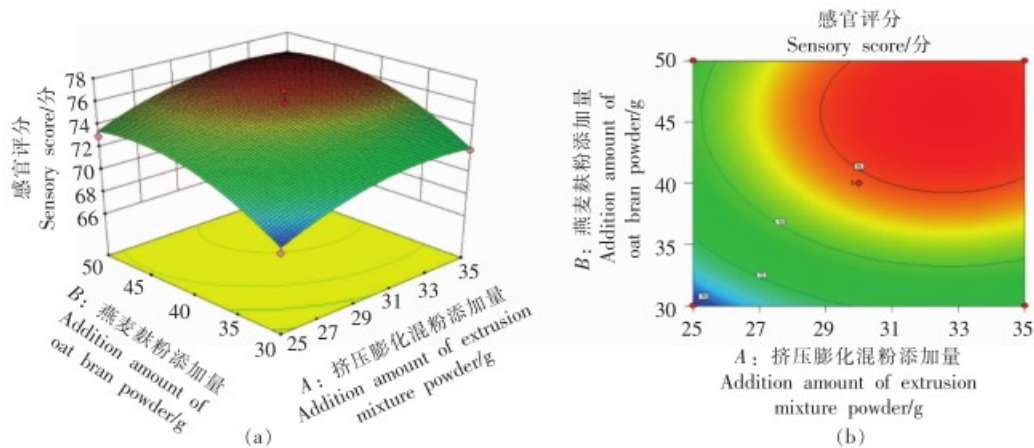


图5 挤压膨化混粉与燕麦麸粉的添加量对代餐粉感官评分的影响

Fig.5 Effect of addition amount of extruded mixture powder and oat bran powder on sensory score of meal replacement powder

应值和交互作用比较显著,当挤压膨化混粉添加量固定时,代餐粉的分散性指数随燕麦麸粉添加量的增加先升高后降低;当燕麦麸粉添加量固定时,代餐粉的分散性指数随挤压膨化混粉添加量

呈上升趋势,等高线沿A轴的变化要比B轴密集,说明挤压膨化混粉添加量对代餐粉分散性指数的影响要比燕麦麸粉添加量大,这与方差分析的结构相一致。

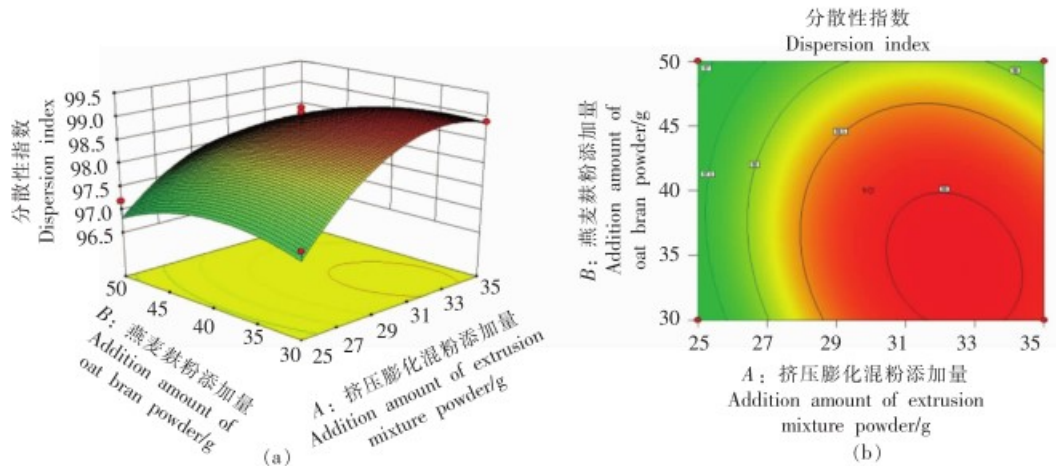


图6 挤压膨化混粉与燕麦麸皮粉添加量对代餐粉分散性指数的影响

Fig.6 Effect of addition amount of extruded mixture powder and oat bran powder on the dispersibility index of meal replacement powder

2.2.5 最佳配方的验证结果 以感官评分和分散性指数为指标得到的最优工艺参数结合实际调整后的配方为:挤压膨化混粉添加量27%、燕麦麸粉添加量33%、脱脂乳粉添加量20%、南瓜粉添加量9%、其它原料共11%,感官评分达到76.78分,分散性指数99.03%。工艺参数与软件给出预测值较吻合,因此,可作为最优工艺参数。经检测,该配方制备的燕麦复合减肥代餐粉总膳食纤维含量为19.71%,其中可溶性膳食纤维占比40.91%。

## 2.3 代餐粉产品指标评价

2.3.1 代餐粉电子鼻分析 PEN3电子鼻包括10个感应器,根据代餐粉气味在10个感应器上的响应数值绘制出代餐粉的雷达分析图,如图7所示。

W1C、W3C、W2W、W5C对芳香成分敏感<sup>[22]</sup>,由上图可知,以上传感器对样品的响应值都比较大,尤其是W1C(对芳香成分和苯类灵敏)和W5C(对短链烷烃芳香成分灵敏),W5S传感器(对氮氧化合物敏感)对样品的响应值极低,这类化合物都

有不同程度的毒性<sup>[23]</sup>,因此最终配方研制的产品具有香气明显和无毒无害的特点。

2.3.2 代餐粉淀粉体外消化率分析 食用快消化淀粉含量高的食物是血糖升高的主要原因,采用体外模拟胃肠道模型可以进一步分析代餐粉的消化情况,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,体外的淀粉模拟消化过程中,代餐粉的淀粉水解速率在前 20 min 增长较快,在 60 min 后趋于稳定,符合人体淀粉的消化特性<sup>[24-25]</sup>。经过计算和对比淀粉消化曲线下 AUC 面积得 eGI 值,产品 eGI 值为 73.41,属于中 GI(55<GI<75)。产品并非低 GI 的原因是微粉碎后的燕麦麸粉、脱脂乳粉和南瓜粉含有较多碳水化合物,比较容易分散在溶液中,因此造成 eGI 值偏高。本产品中的挤压膨化混粉中含有较多的慢消化淀粉、抗性淀粉和魔芋葡甘露聚糖,燕麦麸粉含有较多 $\beta$ -葡聚糖,抗性淀粉已被证实可以明显降低人体消化速

率且对人体有益<sup>[26-27]</sup>,相关研究发现,掺入 $\beta$ -葡聚糖和魔芋葡甘露聚糖等非淀粉类水溶性多糖也可以降低淀粉体系的消化率,主要原因是通过胃部吸水形成胶体,利用黏度效应影响淀粉消化<sup>[28]</sup>,食用后具有长时饱腹感,也可以调节肠道微生物来保持健康状态<sup>[29]</sup>,因此本研究代餐粉具有健康减肥的意义。

### 3 结论

本研究在单因素试验基础上进行响应面试验,优化了燕麦复合膳食纤维代餐粉的制备工艺,得到的最终配方为挤压膨化混粉 27%、燕麦麸粉添加量 33%、脱脂乳粉添加量 20%、南瓜粉添加量 9%和其它原料共 11%,在该条件下,产品的感官评分达到 76.78 分,分散性指数达到 99.03%,其中膳食纤维含量为 19.71%,可溶性膳食纤维占比 40.91%,并且具有多种香气成分。淀粉的体外消化结果显示,燕麦复合膳食纤维代餐粉为中 GI 食物,食用可以补充膳食纤维,延长饱腹感。上述研究结果将燕麦麸皮和马齿型玉米等难以加工的材料进行高值化利用,为杂粮副产物加工方式及产品优化提供思路。

### 参 考 文 献

- [1] 刘俭,蔡永国,王霞伟,等.沙棘营养代餐粉的研制及其流变特性[J].食品工业科技,2019,40(8):163-169.  
LIU J, CAI Y G, WANG X W, et al. Preparation and rheological properties of nutritional seabuckthorn meal replacement powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 163-169.
- [2] 张曼,张美莉,郭军.中国燕麦加工现状及产业发展趋势[J].农产品加工(学刊),2014(8):49-51.  
ZHANG M, ZHANG M L, GUO J. Oat processing status and development trend of the industry in China[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(8): 49-51.
- [3] 郭琦.燕麦高膳食纤维冲调粉的研制[D].太原:山西农业大学,2018.  
GUO Q. Development of high dietary fiber mining powder[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018.

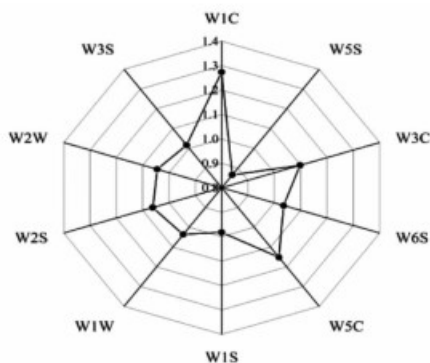


图 7 高纤维谷物代餐粉的电子鼻雷达分析图谱

Fig.7 Electronic nose radar analysis map of high-fiber cereal meal replacement powder

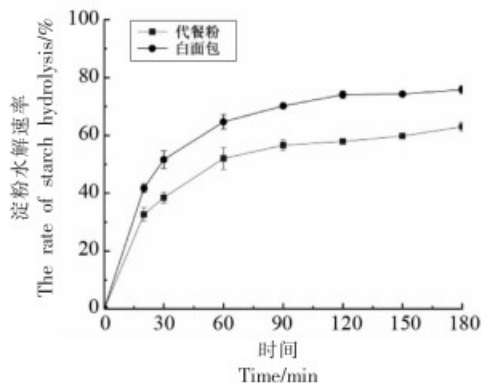


图 8 高纤维谷物代餐粉的淀粉体外消化率

Fig.8 *In vitro* starch digestibility of high-fiber cereal meal replacement powder



- [4] WANG J J, LI M F, WANG C, et al. Effect of extrusion processing and addition of purple sweet potatoes on the structural properties and *in vitro* digestibility of extruded rice [J]. *Food & Function*, 2021, 12(2): 739-746.
- [5] XIE Y, ZHU M, LIU H, et al. Effects of  $\beta$ -glucan and various thermal processing methods on the *in vitro* digestion of hullless barley starch [J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 129952.
- [6] 王元. 魔芋葡甘聚糖的结构及保健功能研究[J]. *现代食品*, 2021(7): 113-115.  
WANG Y. Study on the structure and health function of konjac glucomannan [J]. *Nutrition and Health*, 2021(7): 113-115.
- [7] ZHANG J, ZHANG M, WANG C, et al. Effects of high hydrostatic pressure on microstructure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of oat starch/ $\beta$ -glucan mixtures [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 57 (4): 1888-1901.
- [8] 申瑞玲, 程珊珊, 张勇. 微粉碎对燕麦麸皮营养成分及物理特性的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2008(3): 17-18.  
SHEN R L, CHENG S S, ZHANG Y. Effect of grinding on nutrient components and physical characteristics of oat bran [J]. *Cereal and Feed Industry*, 2008(3): 17-18.
- [9] TORKOVA A A, LISITSKAYA K V, FILIMONOV I S, et al. Physicochemical and functional properties of *Cucurbita maxima* pumpkin pectin and commercial citrus and apple pectins: A comparative evaluation [J]. *PLoS One*, 2018, 13(9): e0204261.
- [10] 吴琼. 葛根全粉制备工艺及品质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.  
WU Q. Study on preparation technology and quality of pueraria powder [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [11] 郭新月, 张美莉. 挤压膨化对燕麦麸皮物理特性的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(8): 134-140.  
GUO X Y, ZHANG M L. Effect of extrusion on the physical properties of oat bran [J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(8): 134-140.
- [12] 吴淼, 康建平, 刘建, 等. 杜仲雄花代餐粉冲调特性改良[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(1): 118-123.  
WU M, KANG J P, LIU J, et al. Improvement of flushing and blending characteristics of eucommia male flower meal replacement powder [J]. *China Food Additives*, 2020, 31(1): 118-123.
- [13] 孙学颖, 辛晓琦, 刘建林, 等. 不同配料及发酵剂对羊肉发酵香肠滋味及香气成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(11): 21-27, 36.  
SUN X Y, XIN X Q, LIU J L, et al. Effects of different ingredients and starter culture on the flavor and aroma components of fermented mutton sausage [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(11): 21-27, 36.
- [14] GONI I, ALEJANDRA G A, FULGENCIO S C. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427-437.
- [15] 豁银强, 刘松继, 陈江平, 等. 麦冬多糖对大米淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(11): 48-53.  
HUO Y Q, LIU S J, CHEN J P, et al. Effects of *Ophiopogon japonicus* polysaccharide on gelation and gel properties of rice starch [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(11): 48-53.
- [16] NIU M, HOU G G, WANG L, et al. Effects of superfine grinding on the quality characteristics of whole-wheat flour and its raw noodle product [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(2): 382-388.
- [17] 许锡凯, 辛嘉英, 任佳欣, 等. 水溶性膳食纤维的提取方法及其在食品中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(4): 203-208.  
XU X K, XIN J Y, REN J X, et al. Study on extraction method of soluble dietary fiber and its application in food [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(4): 203-208.
- [18] 张丽娟, 李燕, 周剑丽, 等. 一种降糖代餐粉的配方研究及质量评价[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(9): 95-100.  
ZHANG L J, LI Y, ZHOU J L, et al. Formulation of a kind of hypoglycemic meal-replacement powder and quality evaluation [J]. *Food Research And Development*, 2019, 40(9): 95-100.
- [19] 曹淼, 化志秀, 童斌, 等. 响应面法优化酸角海绵蛋糕的制作工艺[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(12): 164-169.  
CAO M, HUA Z X, TONG B, et al. Optimization of preparation technology of tamarind sponge cake by response surface methodology [J]. *Food Research*

- and Development, 2019, 40(12): 164–169.
- [20] 杨颖, 潘兆平, 李绮丽, 等. 响应面法优化赣南脐橙全果果酱微波制作工艺[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 167–175.
- YANG Y, PAN Z P, LI Q L, et al. Optimization of microwave production process of gannan navel orange whole fruit jam by response surface methodology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(12): 167–175.
- [21] 吕曼曼, 刘航, 苗修港, 等. 超声波辅助提取高粱全粉色素工艺及其体外抗氧化性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 39–45.
- LÜ M M, LIU H, MIAO X G, et al. Ultrasonic-assisted extraction and *in vitro* antioxidant activity of pigment from sorghum flour[J]. Food Science, 2014, 35(16): 39–45.
- [22] 刘建林, 孙学颖, 张晓蓉, 等. GC-MS结合电子鼻、电子舌分析发酵羊肉干的风味成分[J]. 中国食品学报, 2021, 21(5): 348–354.
- LIU J L, SUN X Y, ZHANG X R, et al. Analysis of flavor components of fermented mutton jerky by GC-MS combined with electronic nose/electronic tongue[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 348–354.
- [23] YUAN H, CHEN X, SHAO Y, et al. Quality evaluation of green and dark tea grade using electronic nose and multivariate statistical analysis[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(12): 3411–3417.
- [24] 韩玲玉, 汪丽萍, 谭斌, 等. 7种杂粮抗氧化活性及其挤压杂粮粉体外消化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 45–52.
- HAN L Y, WANG L P, TAN B, et al. Comparative study of 7 kinds of cereals on antioxidant activity and *in vitro* digestion characteristics of extruded cereal powders[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(6): 45–52.
- [25] XIE F, HUANG Q, FANG F, et al. Effects of tea polyphenols and gluten addition on *in vitro* wheat starch digestion properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 525–530.
- [26] 任娜梅, 马葵, 胡新中. 抗性淀粉体外分析方法的优劣势比较及研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(11): 169–178.
- REN N M, MA Z, HU X Z. Comparison of advantages and disadvantages and the research advances on the *in vitro* analysis of resistant starch determination[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(11): 169–178.
- [27] LOCKYER S, NUGENT A P. Health effects of resistant starch[J]. Nutrition Bulletin, 2017, 42(1): 10–41.
- [28] REGAND A, CHOWDHURY Z, TOSH S M, et al. The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycaemic response by modifying starch digestibility[J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 297–304.
- [29] DONG J L, ZHU Y Y, MA Y L, et al. Oat products modulate the gut microbiota and produce anti-obesity effects in obese rats[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 25: 408–420.

### Preparation of High Fiber Cereal Meal Replacement Powder by Extrusion and Ultrafine Grinding and Evaluation of Its Quality

Huo Rui, Zhang Meili\*, Zhang Yuanyuan, Bai Xue, Zhang Yakun, Guo Xinyue  
(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

**Abstract** In this study, a meal replacement powder rich in dietary fiber was prepared. The main raw materials were oat-corn-konjac extruded powder and oat bran powder, and the auxiliary ingredients were skim milk powder, whole powder of *Pueraria lobata*, pumpkin powder, etc. The sensory score and dispersibility index were used as indicators, and the response surface test was optimized on the basis of single-factor experiments. The final optimal process formulation of meal replacement powder was 27% extruded powder, 33% oat bran powder, 20% skim milk powder, and 9% pumpkin powder, and under these conditions, the sensory score of meal replacement powder was 76.78 and the dispersibility index was 99.03%. The total dietary fiber content of the final product was 19.31%, the soluble dietary fiber was 11.42%, and the estimated glycemic index (eGI) was 73.41, which is a medium GI food.

**Keywords** response surface methodology; meal replacement powder; dietary fiber; *in vitro* digestibility