

# 青麦仁代餐粉的配方优化

张康逸, 何梦影, 康志敏, 高玲玲, 孙凡舒

(河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南郑州 450002)

**摘要:** 为优化青麦仁复合代餐粉配方, 采用单因素和均匀设计进行优化试验, 并对结果进行多元回归分析。单因素试验结果表明: 青麦仁粉添加量、青麦仁粉粒度、木糖醇添加量、羧甲基纤维素钠(CMC-Na)添加量、柠檬酸钠添加量对代餐粉冲调特性有较大影响。均匀设计及主成分分析结果表明: 感官评分受柠檬酸钠添加量的影响程度大于青麦仁粉粒度; 润湿性受各因素影响的主次顺序为 CMC-Na 添加量>青麦仁粉粒度; 溶解度、分散性、水合能力受各因素影响情况符合二次多项式回归模型; 提取的 4 个主成分能解释 92.72% 的指标信息, 达到指标降维目的; 岭回归分析建立的综合得分回归模型具有较好的拟合度; 偏最小二乘法回归分析预测最佳工艺参数为: 青麦仁粉添加量 61%, 小米粉与燕麦粉添加量分别为 18%、12%, 青麦仁粉粒度 125 目, 木糖醇添加量 8%, CMC-Na 添加量 0.85%, 柠檬酸钠添加量 0.28%, 实际综合得分为 1.13, 均高于试验组中的最高分。本研究参数为后续青麦仁代餐粉产品推广奠定基础。

**关键词:** 青麦仁代餐粉; 配方优化; 均匀设计; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2020)01-184-191

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.1.026

## Optimization of Green Wheat Berry Meal Replacement Powder Formula

ZHANG Kang-yi, HE Meng-ying, KANG Zhi-min, GAO Ling-ling, SUN Fan-shu

(Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To optimize the formula of green wheat berry meal replacement powder, single factor experiment and uniform design methods combined with multiple regression analysis were used to process data. The single factor experiment results illustrated that the additions of green wheat berry powder, xylitol, CMC-Na and sodium citrate and particle size of green wheat berry powder were the factors with a great influences on dissolving quality of meal replacement powder. Uniform design and principal component analysis showed that the factors influencing sensory evaluation were ordered as: sodium citrate addition>particle size of green wheat berry powder; and the factors influencing wettability were ordered as: CMC-Na additions>particle size of green wheat berry powder. Solubility, dispersibility and hydratability were followed by the quadratic polynomial regression models. The four principal components extracted accounted for 92.72 % of the total variation, thus achieving dimensional reduction; Through ridge regression analysis, a regression model for comprehensive score was established with a good degree of fitting. Partial least squares regression analysis predicted the best formula: green wheat berry powder (61%), millet flour (18%), oat powder (12%), xylitol (8%), CMC-Na (0.85%), sodium citrate (0.28%) and green wheat berry powder (125 mesh), under which the comprehensive score was 1.13. The solubility of the product was good. This study laid the foundation for promoting green wheat berry meal replacement powder.

**Key words:** green wheat berry meal replacement powder; formula optimization; uniform design; principal component analysis

青麦仁是乳期后熟、蜡熟期收获的嫩小麦粒。碧绿鲜亮, 富有嚼劲, 有青涩新鲜的麦香味, 并且含有丰富的蛋白质、膳食纤维、叶绿素和  $\alpha$ 、 $\beta$  两种淀粉酶, 多种营养成分高于成熟小麦, 是一种绿色健康食品, 其经济价值和市场前景广受各界的关注, 具有良

收稿日期: 2019-08-06

基金项目: 河南省重大科技专项 (151100111300); 河南省鲜食谷物加工工程中心 (2016); 河南省全谷物小麦制品加工国际联合实验室 (2017); 传统小麦制品加工技术集成基地 (2017)

作者简介: 张康逸 (1981-), 男, 副研究员, 研究方向: 农副产品加工

通讯作者: 何梦影 (1989-), 女, 助理研究员, 研究方向: 农副产品加工

好的发展前景<sup>[1,2]</sup>。然而青麦仁作为鲜食全谷物, 含水量较高, 不易保存, 其感官及营养品质在贮藏过程中会大大降低, 丧失了最佳食用口感<sup>[3]</sup>, 而干制成粉后的谷物全粉则具有较长的保存期限<sup>[4]</sup>。通过调配作为即食谷物代餐粉冲调食用, 具有良好的饱腹感, 能够给人体提供一定量的能量, 代餐粉是由一种或多种原辅料, 按照一定的方法、比例混合调配而成的一类冲调粉剂产品<sup>[5]</sup>, 由于其食用方便快捷, 适应人群较广, 成为流行的营养代餐产品之一<sup>[6]</sup>。目前市场上有单一原料的代餐粉, 如蒋勇等<sup>[7]</sup>开发的豆渣代餐粉, 具有低能量、低钠盐、营养均衡的特点; 也有多种复合原

料的代餐粉,如藜麦南瓜复合粉,营养丰富、冲调性良好<sup>[8]</sup>。复合代餐粉能够将原料各自的活性成分互相结合、取长补短,协同增效的作用远比单个营养素更加有利于人体健康<sup>[9]</sup>。小米是中国北方人民的主要粮食之一,含有多种营养物质以及8种人体必需的氨基酸<sup>[10]</sup>。燕麦,是一种低糖、高养分食品,可以有效地预防高血压、糖尿病、肥胖症等病症<sup>[11]</sup>。以青麦仁为主料,同时与小米、燕麦进行复配,来提供更加全面的营养物质。

本研究以感官评分、溶解度、分散性、润湿性及水合能力为考察指标,通过单因素和均匀设计试验,结合主成分分析及其它多元统计分析方式,对青麦仁复合代餐粉的配方进行优化,确定最佳工艺参数,为青麦仁相关产品的开发与推广提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

速冻鲜食青麦仁,河南省农科院农副产品加工研究所。食品添加剂木糖醇、羧甲基纤维素钠、柠檬酸钠均购自山东优索化工科技有限公司;小米粉、燕麦粉均购自阜新佳麦粮品有限公司。

### 1.2 仪器与设备

AL204 电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;HC-400Y 多功能粉碎机,河城工贸有限公司;HH-6 数显电子恒温水浴锅,常州国华电器有限公司;DHG-9240A 电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;JW-1042 常温低速离心机,安徽嘉文仪器装备有限公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,河南省予华仪器有限公司;DL-5 色彩色差计,美国 Hunter Lab 公司;SBH-600 三维混合机,广州雷迈机械设备有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 青麦仁复合代餐粉的制备工艺

##### 1.3.1.1 青麦仁粉的制备

将速冻青麦仁解冻后,清洗、除杂,沥干水分,100 °C沸水中漂烫 2 min,漂烫完成后捞出冷水冲洗 3~5 次,沥水晾干,在物料厚度为 2 mm、55 °C 条件下烘干 16 h,粉碎过筛。

##### 1.3.1.2 青麦仁复合代餐粉的制备

将过筛后的青麦仁粉按一定比例与熟化后的小米粉、燕麦粉(质量比 3:2)进行配比,同时添加木糖

醇、CMC-Na 以及柠檬酸钠进行复配,将复配完成的代餐粉进行二次粉碎,并放入混合机中混匀后包装。

#### 1.3.2 青麦仁复合代餐粉的测定指标及方法

##### 1.3.2.1 感官评价

选 20 名有经验的评价员组成评价小组,在进行品评时随机放置,分别对青麦仁代餐粉的组织状态、气味、色泽、口感、冲调性进行综合评价,结果取平均值。评定标准见表 1。

表 1 感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation

项目	评分标准
组织状态 20分	粉末细腻无杂质,无结块,手捏不成团 15~20分
	无结块,稍有粗粒杂质,稍有粗糙感 10~15分
	稍有结块,有粗粒,手捏有粗糙感 5~10分
	吸湿有霉变,结块,手捏成团,有粗粒 0~5分
气味 20分	有谷物香味及青麦仁香气,无异味 15~20分
	有谷物香味及青麦仁香气,无异味 10~15分
	无谷物香味、过浓或过淡,无异味 5~10分
	有霉味、酸味或其它异味 0~5分
色泽 20分	颜色明亮,呈黄绿色,色泽浓淡适宜 15~20分
	颜色较亮,色泽均匀,稍浓或稍淡 10~15分
	色泽较均匀,过浓或过淡 5~10分
	色泽不均匀,颜色暗淡,无亮感 0~5分
口感 20分	无异味,口感香甜,口感细腻 15~20分
	无异味,微微香甜味,略有颗粒感 10~15分
	略有异味,口感粗糙 5~10分
	酸苦或有其它异味 0~5分
冲调性 20分	基本无结块,无分层,略搅拌后快速溶解 15~20分
	有少量结块,无分层,略搅拌后部分溶解 10~15分
	有较多结块,略有分层,略搅拌后部分溶解 5~10分
	不溶解,分层严重,有大量结块 0~5分

##### 1.3.2.2 溶解度

参照 Abbasi 等<sup>[12]</sup>的方法并作改进,精确称量样品 5 g,置于 50 mL 烧杯中,加入 30 mL 去离子水,置于磁力搅拌器搅拌 30 min。将溶液转移至 50 mL 容量瓶中,并用去离子水定容。取 15 mL 该溶液放入离心管中,3000 r/min 离心 10 min,取上清液,转移至铝盒中,在水浴中加热 20 min,随后放入 105 °C 干燥箱中烘干至质量恒定。溶解度的计算公式如下:

$$X = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{(1 - B)m}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 为试验溶解度/(g/100 g); m 为样品质量/g;  $m_1$  为称量皿质量/g;  $m_2$  为称量皿和不溶物干燥后质量/g; B 为试样水分含量/%。

##### 1.3.2.3 分散性<sup>[13]</sup>

在磁力搅拌器上放置盛有 50 mL 以及 50 °C 去离子水的烧杯, 准确称量 1 g 青麦仁复合代餐粉, 快速均匀散布于水中, 记录粉体完全分散在水中所消耗的时间, 即为分散时间。

#### 1.3.2.4 润湿性<sup>[14]</sup>

在 250 mL 烧杯中加入 50 °C 的 200 mL 去离子水, 准确称取 0.5 g 青麦仁复合代餐粉均匀散布在水面上, 准确记录粉体从加入至全部沉降所需时间。

#### 1.3.2.5 水合能力<sup>[15]</sup>

称取 0.5 g 青麦仁代餐粉, 加入离心管中, 逐次少量地加水, 并用玻璃棒搅拌均匀, 使粉体完全溶解, 3000 r/min 离心 20 min, 弃去上清液, 称沉淀的质量。计算每克粉体吸收水分的质量, 即为青麦仁代餐粉的水合能力, 计算公式如下:

$$\text{水合能力} = \frac{(m_2 + m_1) - (m_2 + m)}{m} \quad (2)$$

式中:  $m$  为样品质量/g;  $m_1$  为沉淀质量/g;  $m_2$  为离心管质量/g。

#### 1.3.3 青麦仁复合代餐粉配方优化的单因素试验

根据 GB2760-2014<sup>[16]</sup>和具体试验操作确定青麦仁粉粒度、添加量及各添加剂添加量的取值范围: 青麦仁粉粒度为 60 目、80 目、100 目、120 目、140 目; 青麦仁粉添加量为 55%、60%、65%、70%、75%; 木糖醇添加量为 4%、6%、8%、10%、12%; CMC-Na 添加量为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%; 柠檬酸钠添加量为 0.22%、0.24%、0.26%、0.28%、0.30%。设计单因素试验, 考察不同配比对青麦仁代餐粉的感官评分、溶解度、分散性、润湿性以及水合能力的影响。

#### 1.3.4 均匀设计实验方案

表 2 均匀设计试验因素水平  $U_{10}(10^5)$

Table 2 Uniform design test factor level  $U_{10}(10^5)$

试验号	X <sub>1</sub> 青麦仁粉添加量/%	X <sub>2</sub> 青麦仁粉粒度/目	X <sub>3</sub> 木糖醇添加量/%	X <sub>4</sub> CMC-Na 添加量/%	X <sub>5</sub> 柠檬酸钠添加量/%
1	65	110	5.5	0.85	0.24
2	64	105	7.5	0.40	0.28
3	69	115	9.0	0.45	0.23
4	61	90	6.0	0.50	0.22
5	67	125	7.0	0.60	0.20
6	70	95	6.5	0.65	0.27
7	62	120	8.5	0.75	0.26
8	66	80	10.0	0.55	0.25
9	63	100	9.5	0.70	0.19
10	68	85	8.0	0.80	0.21

在单因素的基础上, 采用五因素十水平的均匀设计方案, 以感官评分、溶解度、分散性、润湿性以及水合能力为考察指标进行试验。研究青麦仁粉添加量、青麦仁粉粒度、木糖醇添加量、CMC-Na 添加量以及柠檬酸钠添加量对各项指标的影响, 并进行主成分分析, 岭回归及最小偏二乘回归等多元统计分析。均匀设计试验因素水平  $U_{10}(10^5)$  见表 2。根据主成分得分计算均匀设计各组试验产品综合得分  $F_i$ :

$$F_i = F_1P_1 + F_2P_2 + F_3P_3 + F_4P_4 + F_5P_5 \quad (3)$$

式中  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$  分别为主成分得分,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  为主成分贡献率/%。

## 1.4 统计方法

采用 SPSS.V19.0、DPS7.05 对数据进行处理统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 青麦仁粉添加量对复合代餐粉冲调特性的影响

由表 3 可知, 随着青麦仁粉添加量的增加, 感官评分、溶解度、水合能力都呈现出增大的趋势, 在添加量为 70% 时达到最大值, 分别为 81.19%、81.79% 和 2.5 mL/g, 继而则呈现出减小的趋势。青麦仁淀粉含量较高<sup>[17]</sup>, 添加量过高影响冲调口感与品质, 65% 时分散性与润湿性达到最小值, 分别为 13.92 s、66.07 s, 分散与湿润速度较快。综合考虑, 青麦仁粉添加量在 70% 以内较为适宜。

#### 2.1.2 青麦仁粉粒度对青麦仁复合代餐粉冲调

## 特性的影响

由表 4 可知,代餐粉的感官评分、溶解度与水合能力在青麦仁粉粒度为 120 目时达到最大值,分别为 85.33%、82.50%、2.13 mL/g。分散性与润湿性则分别在粒度为 80 目与 100 目时达到最小值,为 13.12 s、77.83 s。青麦仁粉粒度过大,粉料粗糙,会使代餐粉冲调后颗粒感增强,但粉料粒度过细,则会使青麦仁中膳食纤维结构被破坏,导致粉体膨胀力及锁水力变差,冲调性能下降,这一结论与张迅等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。因此,青麦仁粉粒度在 80~120 目之间较为适宜。

表 3 青麦仁粉添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

Table 3 Effect of green wheat berry powder addition on reconstitutability of green wheat berry complex meal replacement powder

青麦仁粉添加量/%	感官评分	溶解度/%	分散性/s	润湿性/s	水合能力/(mL/g)
55	74.45±1.21 <sup>b</sup>	79.46±0.74 <sup>b</sup>	14.41±0.29 <sup>bc</sup>	103.27±2.33 <sup>a</sup>	1.98±0.03 <sup>b</sup>
60	80.03±1.57 <sup>a</sup>	80.47±0.38 <sup>ab</sup>	15.89±1.21 <sup>a</sup>	99.11±0.88 <sup>a</sup>	2.01±0.06 <sup>b</sup>
65	78.91±1.18 <sup>a</sup>	80.54±1.25 <sup>ab</sup>	13.92±0.94 <sup>c</sup>	66.07±4.46 <sup>c</sup>	2.09±0.03 <sup>b</sup>
70	81.19±1.87 <sup>a</sup>	81.79±0.57 <sup>a</sup>	15.70±0.37 <sup>ab</sup>	90.40±2.96 <sup>b</sup>	2.50±0.14 <sup>a</sup>
75	78.85±1.18 <sup>a</sup>	79.93±1.05 <sup>b</sup>	14.30±0.69 <sup>bc</sup>	89.84±1.15 <sup>b</sup>	2.11±0.08 <sup>b</sup>

注:同一列中不同字母表示数值存在显著差异( $p<0.05$ )。下表同。

表 4 青麦仁粉粒度对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

Table 4 Effect of particle size of green wheat berry powder on reconstitutability of green wheat berry complex meal replacement powder

青麦仁粉粒度/目	感官评分	溶解度/%	分散性/s	润湿性/s	水合能力/(mL/g)
60	80.33±0.58 <sup>b</sup>	76.67±1.81 <sup>c</sup>	14.55±0.23 <sup>ab</sup>	85.96±3.90 <sup>b</sup>	1.96±0.10 <sup>b</sup>
80	80.67±1.15 <sup>b</sup>	77.99±0.56 <sup>c</sup>	13.12±1.10 <sup>c</sup>	80.96±1.39 <sup>cd</sup>	1.94±0.08 <sup>b</sup>
100	84.67±1.14 <sup>a</sup>	77.52±0.58 <sup>c</sup>	13.97±0.14 <sup>bc</sup>	77.83±2.03 <sup>d</sup>	2.05±0.02 <sup>ab</sup>
120	85.33±2.08 <sup>a</sup>	82.50±0.39 <sup>a</sup>	15.42±0.26 <sup>a</sup>	82.64±2.51 <sup>bc</sup>	2.13±0.07 <sup>a</sup>
140	84.67±2.31 <sup>a</sup>	80.71±0.70 <sup>b</sup>	15.76±0.87 <sup>a</sup>	92.78±0.66 <sup>a</sup>	2.04±0.10 <sup>ab</sup>

表 5 木糖醇添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

Table 5 Effect of xylitol addition on reconstitutability of green wheat berry complex meal replacement powder

木糖醇添加量/%	感官评分	溶解度/%	分散性/s	润湿性/s	水合能力/(mL/g)
4	80.75±0.66 <sup>b</sup>	76.42±0.34 <sup>c</sup>	18.50±0.41 <sup>a</sup>	82.78±1.63 <sup>a</sup>	2.06±0.02 <sup>b</sup>
6	87.07±1.01 <sup>a</sup>	85.92±0.22 <sup>b</sup>	18.17±0.42 <sup>a</sup>	74.95±0.64 <sup>b</sup>	2.07±0.01 <sup>b</sup>
8	81.00±1.73 <sup>b</sup>	90.65±0.08 <sup>a</sup>	15.86±0.10 <sup>b</sup>	73.16±2.83 <sup>b</sup>	2.24±0.05 <sup>a</sup>
10	82.33±0.58 <sup>b</sup>	90.06±0.88 <sup>a</sup>	12.59±0.20 <sup>d</sup>	62.95±2.35 <sup>c</sup>	1.98±0.05 <sup>c</sup>
12	81.42±0.52 <sup>b</sup>	85.09±0.80 <sup>b</sup>	13.65±0.16 <sup>c</sup>	79.86±1.02 <sup>a</sup>	1.86±0.03 <sup>d</sup>

## 2.1.4 CMC-Na 添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

CMC-Na 作为增稠剂,可以使各种谷物粉在其胶液中均匀稳定的分散<sup>[19]</sup>,但添加过多会使溶液黏度过大,添加过少则增稠作用不明显。由表 6 可知,随着 CMC-Na 添加量的增多,感官评分、溶解度与水合能逐渐增大,但当添加量超过 0.8% 以后则呈现出减小的趋势;分散性与润湿性则分别在添加量为 0.4% 和 0.6%

## 2.1.3 木糖醇添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

由表 5 可知,随着木糖醇添加量的增加,代餐粉的分散性与润湿性不断减小,在添加量为 10% 时达到最小值,分别为 12.59 s 与 62.95 s,之后则开始增大;感官评分、溶解度与水合能力则随着添加量的增加呈现先增大后减小的趋势。适当添加木糖醇能够为代餐粉带来香甜的口感,而添加比例过高则口感过于甜腻,木糖醇对代餐粉口感的影响变化趋势与何兴芬等<sup>[8]</sup>的研究结论较为一致。因此,添加量为 6%~10% 时较为适宜。

时达到最小值,分别为 12.28 s、47.95 s。综上所述,CMC-Na 添加量在 0.4%~0.8% 之间较为适宜。

## 2.1.5 柠檬酸钠添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

由表 7 可知,随着柠檬酸钠添加量的增加,复合代餐粉的感官评分、溶解度和水合能力分别在添加量 0.28%、0.26% 及 0.28% 时达到最大值 84.67、95.70%、2.23 mL/g;分散性与润湿性则在添加量为 0.26% 时达

到最小值, 分别为 10.01 s、64.06 s。柠檬酸钠作为酸味剂添加量不宜过多, 加入过多会使产品偏酸, 失去原有风味, 与韩璐等<sup>[20]</sup>在南瓜汁工艺的研究过程中得到的结论较为一致。综上所述, 柠檬酸钠添加量在

0.28% 以内较为适宜。

## 2.2 均匀设计试验结果

### 2.2.1 指标模型建立

表 6 CMC-Na 添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

**Table 6 Effect of CMC-Na addition on reconstitutability of green wheat berry complex meal replacement powder**

CMC-Na 添加量/%	感官评分	溶解度/%	分散性/s	润湿性/s	水合能力/(mL/g)
0.2	79.84±0.36 <sup>e</sup>	79.99±0.77 <sup>e</sup>	12.78±0.48 <sup>c</sup>	64.54±0.44 <sup>c</sup>	1.71±0.01 <sup>d</sup>
0.4	81.53±0.14 <sup>d</sup>	81.65±0.57 <sup>d</sup>	12.28±0.12 <sup>c</sup>	54.83±0.88 <sup>d</sup>	1.74±0.03 <sup>d</sup>
0.6	84.33±0.58 <sup>c</sup>	89.43±0.40 <sup>c</sup>	13.33±0.18 <sup>b</sup>	47.95±0.74 <sup>e</sup>	1.89±0.03 <sup>e</sup>
0.8	89.08±0.12 <sup>a</sup>	95.43±0.22 <sup>a</sup>	13.44±0.40 <sup>b</sup>	75.53±0.15 <sup>b</sup>	2.02±0.02 <sup>a</sup>
1.0	88.05±0.09 <sup>b</sup>	90.67±0.34 <sup>b</sup>	14.78±0.16 <sup>a</sup>	92.49±1.51 <sup>a</sup>	1.97±0.02 <sup>b</sup>

表 7 柠檬酸钠添加量对青麦仁复合代餐粉冲调特性的影响

**Table 7 Effect of sodium citrate addition on reconstitutability of green wheat berry complex meal replacement powder**

柠檬酸钠添加量/%	感官评分	溶解度/%	分散性/s	润湿性/s	水合能力/(mL/g)
0.22	78.38±0.64 <sup>cd</sup>	89.47±0.45 <sup>c</sup>	11.16±0.38 <sup>bc</sup>	80.66±0.19 <sup>a</sup>	2.09±0.03 <sup>b</sup>
0.24	79.51±0.50 <sup>c</sup>	87.44±0.34 <sup>d</sup>	10.54±0.70 <sup>cd</sup>	79.12±0.57 <sup>b</sup>	2.02±0.02 <sup>d</sup>
0.26	81.19±0.91 <sup>b</sup>	95.70±0.31 <sup>a</sup>	10.01±0.68 <sup>d</sup>	64.06±0.86 <sup>d</sup>	2.06±0.02 <sup>bc</sup>
0.28	84.67±0.58 <sup>a</sup>	90.70±0.17 <sup>b</sup>	12.12±0.52 <sup>ab</sup>	77.81±0.57 <sup>c</sup>	2.23±0.02 <sup>a</sup>
0.30	77.46±0.43 <sup>d</sup>	90.75±0.24 <sup>b</sup>	12.71±0.59 <sup>a</sup>	77.58±0.28 <sup>c</sup>	2.04±0.02 <sup>cd</sup>

表 8 均匀设计试验结果

**Table 8 Uniform design with experimental results**

试验号	Y <sub>1</sub> 感官评分	Y <sub>2</sub> 溶解度/%	Y <sub>3</sub> 分散性/s	Y <sub>4</sub> 润湿性/s	Y <sub>5</sub> 水合能力/(mL/g)
1	90.33±1.53	93.91±0.12	12.72±0.29	73.55±3.16	2.13±0.04
2	90.45±0.62	91.84±0.52	12.42±0.43	42.15±0.85	1.89±0.10
3	92.00±2.00	95.18±0.42	13.42±0.64	39.40±2.44	2.11±0.11
4	82.67±1.15	96.16±0.33	11.67±1.04	38.72±0.63	2.08±0.06
5	87.33±2.52	86.98±1.49	14.24±0.26	55.34±6.59	1.96±0.19
6	86.81±0.70	96.19±0.06	12.09±0.48	43.88±3.40	2.13±0.05
7	90.67±0.58	95.20±0.06	10.29±0.36	85.31±5.44	1.90±0.20
8	83.96±0.30	87.82±0.97	11.57±0.82	45.34±1.65	2.12±0.04
9	85.07±0.12	89.74±1.02	12.32±0.63	51.09±0.89	2.33±0.06
10	81.33±1.53	95.24±0.07	11.93±0.88	63.03±1.21	2.00±0.11

表 9 指标模型概况

**Table 9 Summary of the model parameters**

指标	模型	相关系数 R	P 值
Y <sub>1</sub>	52.985+0.195X <sub>2</sub> +59.738X <sub>5</sub>	0.9165	0.0016
Y <sub>2</sub>	190.529-2.209X <sub>2</sub> +6.420X <sub>3</sub> -1.120X <sub>3</sub> <sup>2</sup> +0.184X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> +0.980X <sub>2</sub> X <sub>4</sub> -12.455X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	0.9894	0.0131
Y <sub>3</sub>	11.564+0.001X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> -0.215X <sub>2</sub> X <sub>5</sub> -0.396X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	0.9112	0.0100
Y <sub>4</sub>	-37.200+0.384X <sub>2</sub> +82.544X <sub>4</sub>	0.8840	0.0049
Y <sub>5</sub>	0.037+17.395X <sub>5</sub> +0.037X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -2.407 X <sub>3</sub> X <sub>5</sub>	0.9544	0.0015

在单因素试验的基础上采用均匀设计方案 U<sub>10</sub>(10<sup>5</sup>)进行试验, 研究各因素与感官评分、溶解度、分散性、润湿性和水合能力之间的关系, 如表 8 所示。对试验数据进行逐步回归分析, 建立指标模型概况如

表 9 所示。感官评分 (Y<sub>1</sub>) 和润湿性 (Y<sub>4</sub>) 在一次回归时方程模型达到极显著水平 (p<0.01), 且相关系数较大, 具有较好的拟合度, 影响感官评分的主要因素为青麦仁粉粒度和柠檬酸钠添加量, 同时, 根据各

因素标准回归系数的绝对值可知<sup>[21]</sup>, 柠檬酸钠添加量对感官评分的影响程度大于青麦仁粉粒度; 影响润湿性的主要因素为青麦仁粉粒度和 CMC-Na 添加量, 对润湿性影响的主次顺序为 CMC-Na 添加量>青麦仁粉粒度。溶解度 ( $Y_2$ )、分散性 ( $Y_3$ )、水合能力 ( $Y_5$ ) 在一次回归时没有因素进入方程模型, 在二次回归时, 溶解度 ( $Y_2$ ) 和分散性 ( $Y_3$ ) 达到显著水平 ( $p<0.05$ ), 水合能力 ( $Y_5$ ) 达到极显著水平 ( $p<0.01$ ), 且相关系数  $R$  均接近 1, 具有良好的拟合度, 方程模型一次回归不显著, 可能是由于溶解度、分散性以及水合能力主要受各因素之间的交互作用影响。

### 2.2.2 主成分分析

如表 10 所示, 通过主成分分析, 根据累计贡献率大于 85% 的原则<sup>[22]</sup>, 提取 4 个主成分, 累计贡献率达到 92.72%, 即提取的 4 个主成分可以解释全部指标 92.7186% 的信息, 说明提取的 4 个主成分能够全面反映青麦仁代餐粉的冲调品质信息。由表 11 可知, 根据指标的特征向量绝对值的大小可以得出, 决定第 1 主成分大小的指标主要是润湿性以及分散性; 决定第 2 主成分大小的指标主要是感官评分; 决定第 3 主成分大小的指标主要是溶解度; 决定第 4 主成分大小的指

标主要是水合能力。

表 10 5 个主成分的特征值、贡献率及累计贡献率

Table 10 Eigenvalues, contribution rates and cumulative contribution rates of five principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	1.7366	34.7315	34.7315
2	1.3242	26.4847	61.2162
3	0.8722	17.4439	78.6601
4	0.7029	14.0585	92.7186
5	0.3641	7.2814	100.0000

表 11 5 个指标的特征向量

Table 11 Eigenvectors of five principal components

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
$Y_1$	0.2357	0.6822	0.3558	0.3783	-0.4574
$Y_2$	0.4428	-0.2807	0.7569	-0.0097	0.3895
$Y_3$	-0.5051	0.5340	0.1533	0.0064	0.6596
$Y_4$	0.5512	0.1084	-0.5065	0.4778	0.4475
$Y_5$	-0.4352	-0.3986	0.1435	0.7928	-0.0514

如表 12 所示, 第 7 组试验产品综合得分最高, 为 1.0354; 第 8 组试验产品综合得分最低, 为 -0.8327。

表 12 指标的主成分得分

Table 12 Principal component scores for index

试验号	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	综合得分
1	0.6089	0.6752	0.0437	1.3245	0.5369	0.6233
2	0.1908	1.2271	0.3149	-1.0672	-0.6934	0.2457
3	-0.5748	1.0637	1.6532	0.3113	-0.0599	0.4099
4	-0.1589	-1.5221	0.7210	-0.8149	0.1060	-0.4394
5	-1.2529	1.8261	-1.1199	-0.5243	0.6155	-0.1757
6	-0.0593	-0.6596	1.0647	0.0353	-0.0102	-0.0053
7	3.1017	0.1927	-0.6193	0.3314	-0.4321	1.0354
8	-0.9864	-0.7444	-1.1426	-0.2164	-0.8685	-0.8327
9	-1.5120	-0.9117	-0.4735	1.3220	-0.2468	-0.6813
10	0.6428	-1.1471	-0.4423	-0.7015	1.0526	-0.1797

### 2.2.3 指标综合得分模型的建立

表 13 综合得分模型方差分析

Table 13 Analysis of variance for comprehensive score

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归	3.0516	5	0.6103	47.7476	0.0012
剩余	0.0511	4	0.0128		
总和	3.1028	9	0.3448		

通过岭回归分析建立综合得分模型, 综合得分如下式:

$$Y = -11.2136 + 0.0806Y_1 + 0.0565Y_2 + 0.0177Y_3 + 0.0126Y_4 - 0.9418Y_5 \quad (4)$$

模型相关系数  $R$  为 0.9917, 拟合度较好, 同时模型方差分析如表 13 所示, 模型极显著 ( $p<0.01$ )。

### 2.2.4 最佳工艺预测及验证

以综合得分为目标, 采用最小偏二乘法建立回归模型, 综合得分取最大值时, 根据模型预测得到最佳工艺参数为: 青麦仁粉添加量 61%, 小米粉与燕麦粉添加量分别为 18%、12%, 青麦仁粉粒度 125 目, 木糖醇添加量 8.0%, CMC-Na 添加量 0.85%, 柠檬酸钠添加量 0.28%。将预测的最佳工艺参数代入表 11 中建立的各项指标模型中进行计算, 得出代餐粉的各项考察指标的预测值, 并将预测值代入 2.2.3 中建立的综合

得分模型中计算,得到预测的综合得分值;同时,按照预测的最佳工艺参数进行试验测定,计算实测值的

综合得分,对比结果见表 14 所示,得到最佳工艺的综合得分均高于试验组中的最高分(第 7 组)。

表 14 最佳工艺验证试验

Table 14 Verification of the optimized process conditions

项目	Y <sub>1</sub> 感官评分	Y <sub>2</sub> 溶解度/%	Y <sub>3</sub> 分散性/s	Y <sub>4</sub> 润湿性/s	Y <sub>5</sub> 水合能力/mL/g	综合得分
预测值	94.09	97.52	8.97	80.96	1.88	1.28
实测值	92.15	95.68	10.52	72.61	2.02	1.13

### 3 结论

本研究综合考虑感官评分、溶解度、分散性、润湿性、水合能力指标,采用单因素和均匀设计相结合的方法对青麦仁复合代餐粉进行配方优化,并对试验数据进行多元统计分析,建立预测模型,得到最佳工艺为:青麦仁粉添加量 61%,小米粉与燕麦粉添加量分别为 18%、12%,青麦仁粉粒度 125 目,木糖醇添加量 8.0%,CMC-Na 添加量 0.85%,柠檬酸钠添加量 0.28%,最佳工艺条件下得到的产品指标分别为感官评分 92.15,溶解度 95.68%,分散性 10.52 s,润湿性 72.61 s,水合能力 2.02 mL/g,综合得分 1.13。所得产品冲调性能较好,本试验建立的指标模型预测能力较好,可用于代餐粉配方优化研究。

### 参考文献

- [1] 刘杰.青麦仁加工让小麦轻松增值[J].科学种养,2014,2: 58-59  
LIU Jie. Green wheat berry processing makes wheat easily value-added [J]. Scientific Breeding, 2014, 2: 58-59
- [2] 何梦影,张康逸,杨帆,等.响应面法优化青麦仁的真空充氮烫漂护色工艺[J].核农学报,2017,31(8):1546-1555  
HE Meng-ying, ZHANG Kang-yi, YANG Fan, et al. Optimization of vacuum nitrogen charge blanching technique of green wheat berry by response surface methodology [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(8): 1546-1555
- [3] 张云忠,季旭东.青麦仁产业化初探[J].中国果菜,2007,6:39-40  
ZHANG Yun-zhong, JI Xu-dong. Industrialization of green wheat berry [J]. China Fruit Vegetable, 2007, 6: 39-40
- [4] 张康逸,何梦影,杨帆,等.真空冷冻干燥条件对多谷物全粉品质影响的研究[J].现代食品科技,2017,33(7):163-171  
ZHANG Kang-yi, HE Meng-ying, YANG Fan, et al. Study on the effect of vacuum freeze-drying on quality characteristics of blended whole cereal flour [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(7): 163-171
- [5] 冯彦君.麦苗酵素粉及其代餐粉的加工与抗氧化功能研究[D].无锡:江南大学,2017  
FENG Yan-jun. Research on process and antioxidant properties of barley ferment powder and its meal replacement powder [D]. Wuxi: Jiang Nan University, 2017
- [6] 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 Jian, CAI Yong-guo, WANG Xia-wei, et al. Preparation and rheological properties of nutritional seabuckthorn meal replacement powder [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 163-169
- [7] 蒋勇,邹勇,周露,等.豆渣微粉的性能及其复配代餐粉对小鼠肠道微生物影响的体外评价[J].食品科学,2015, 36(15): 199-205  
JIANG Yong, ZOU Yong, ZHOU Lu, et al. Properties of micronized okara and of its application in composite meal powder: evaluation of effect on intestinal microflora of mice [J]. Food Science, 2015, 36(15): 199-205
- [8] 何兴芬,杨富民,张明霞,等.藜麦南瓜复合粉配方的优化[J].现代食品科技,2019,35(4):209-216  
HE Xing-fen, YANG Fu-min, ZHANG Ming-xia, et al. Optimization of quinoa and pumpkin compound powder formula [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 209-216
- [9] 杨金枝,林亚玲,耿思增,等.全谷物食品开发的新形式及发展方向[J].农业机械,2011,22:86-89  
YANG Jin-zhi, LIN Ya-ling, GENG Si-zeng, et al. New form and development direction of whole grain food development [J]. Farm Machinery, 2011, 22: 86-89
- [10] 韩雍,汪慧,宋曦.小米速溶粉加工工艺条件的筛选[J].食品研究与开发,2015,36(23):90-93  
HAN Yong, WANG Hui, SONG Xi. Conditions selection of instant millet powder processing [J]. Food Research and Development, 2015, 36(23): 90-93
- [11] 任嘉嘉.燕麦制粉及挤压膨化技术研究[D].北京:中国农业科学院,2008  
REN Jia-jia. Study on the milling and extrusion technology of oats [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008

- [12] Abbasi E, Azizpour M. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 105-110
- [13] 张妍,高蕾,王正红,等.响应面法优化喷雾干燥制备核桃分心木速溶粉及其冲调性分析[J].食品科学,2016,37(18): 47-51  
ZHANG Yan, GAO Lei, WANG Zheng-hong, et al. Response surface optimization of production of instant walnut diaphragm powder by spray drying and analysis of its reconstitution properties [J]. Food Science, 2016, 37(18): 47-51
- [14] Sangnark A, Nookhorm A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse [J]. Food Chemistry, 2003, 80(2): 221-229
- [15] 张钟,刘晓明.不同干燥方法对生姜粉物理性质的影响[J].农业工程学报,2005,12(11):186-188  
ZHANG Zhong, LIU Xiao-ming. Effects of different drying methods on physical properties of ginger powder [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 12(11): 186-188
- [16] 中华人民共和国卫生部.食品安全国家标准 食品添加剂使用标准:GB 2760-2014[S].北京:中国标准出版社,2014  
Ministry of Health of the People's Republic of China. National Standard of Food Safety, Standards for uses of Food Additive: GB 2760-2014[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2014
- [17] 张康逸,宋范范,杨妍,等.过热蒸汽处理对青麦仁的减菌效果及品质的影响[J].现代食品科技,2017,33(12):216-220  
ZHANG Kang-yi, SONG Fan-fan, YANG Yan, et al. Effect of superheated steam treatment on bacteria-reducing and quality of green wheat berry [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(12): 216-220
- [18] 张迅,罗嘉妮,钟耕.不同粒度密本南瓜粉的物化特性及抗氧化性[J].食品科学,2017,38(21):132-137  
ZHANG Xun, LUO Jia-ni, ZHONG Geng. Physicochemical properties and antioxidant activity of *Cucurbita moschata* duch. powder with different particle sizes [J]. Food Science, 2017, 38(21): 132-137
- [19] DU Bai-qiao, LI Jing, ZHANG Hong-bin, et al. The stabilization mechanism of acidified milk drinks induced by carboxymethyl cellulose [J]. Lait, 2007, 87(4-5): 287-300
- [20] 韩璐,杨陈,王胜男,等.基于流变学参数及混料回归设计的浑浊型南瓜汁饮料工艺及配方优化[J].食品工业科技,2017, 38(7):193-198  
HAN Lu, YANG Chen, WANG Sheng-nan, et al. Application of rheological parameters and mixture design to optimize the formula of cloudy *pumpkin* juice beverages [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 193-198
- [21] 江宁,刘春泉,李大婧.均匀设计法优化冬瓜膨化工艺[J].核农学报,2014,28(2):270-277  
JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jing. Optimization of puffing technology for wax gourd chips by uniform design [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(2): 270-277
- [22] 李玉龙,杨焯,陆国权.基于均匀设计和主成分分析的甘薯薯片常压油炸工艺优化[J].核农学报,2017,31(1):118-124  
LI Yu-long, YANG Ye, LU Guo-quan. Optimization of sweet potato chips frying process under normal pressure based on uniform design and principal component analysis [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(1): 118-124

---

(上接第 112 页)

- [20] Zhou Y, Zhao Y, Wang L, et al. Radiation synthesis and characterization of nanosilver/gelatin/carboxymethyl chitosan hydrogel [J]. Radiation Physics & Chemistry, 2012, 81(5): 553-560
- [21] Kim J S, Kuk E, Yu K N, et al. Antimicrobial effects of silver nanoparticles. Nanomed: NBM 3: 95-101 [J]. Nanomedicine Nanotechnology Biology & Medicine, 2007, 3(1): 95-101