

肖志刚, 陈岚, 岳程程, 等. 基于线性规划法优化高膳食纤维分层米糠代餐粉配方 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 384–389. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110147

XIAO Zhigang, CHEN Lan, YUE Chengcheng, et al. Optimization of Layered Rice Bran Meal Replacement Powder Formula of High Dietary Fiber Based on Linear Programming Method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 384–389. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110147

· 营养与保健 ·

基于线性规划法优化高膳食纤维分层 米糠代餐粉配方

肖志刚, 陈 岚, 岳程程, 苏丽娜, 李芮芷, 王 鹏*
(沈阳师范大学粮食学院, 沈阳 110034)

摘 要: 以四层米糠、大豆粉、紫米粉、香菇粉、玉米粉、红薯粉、红枣粉为主要原料, 利用线性规划法设计分层米糠代餐粉, 以膳食纤维含量不低于总质量 13%, 且价格不得高于 6 元/份为主要约束条件, 获得五种分层米糠代餐粉配方。通过对分层米糠代餐粉进行感官评价、水合特性以及自由基清除率比较, 进一步确定了最优配方。结果表明, 最优配方各成分含量为米糠 1# 30 g、米糠 2# 30 g、米糠 3# 98.68 g、米糠 4# 34 g、大豆粉 22 g、紫米粉 26 g、香菇粉 14 g、玉米粉 10 g、红薯粉 18 g、红枣粉 30 g, 分层米糠代餐粉膳食纤维含量为 16.03%, 感官评分 80 分。在 25 和 100 ℃ 时, 代餐粉吸水指数为: 1.07 和 1.19; 水溶性为: 68.46% 和 71.22%; 膨胀势为: 3.38 和 4.15; DPPH 和 ABTS⁺ 的自由基清除率为 42.59% 和 57.52%。该分层米糠代餐粉具有较高的膳食纤维含量和较强的抗氧化活性。

关键词: 分层米糠代餐粉, 线性规划, 理化性质, 膳食纤维, 抗氧化性

中图分类号: TS210.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)16-0384-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110147

本文网刊:



Optimization of Layered Rice Bran Meal Replacement Powder Formula of High Dietary Fiber Based on Linear Programming Method

XIAO Zhigang, CHEN Lan, YUE Chengcheng, SU Lina, LI Ruizhi, WANG Peng*

(College of Grain, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: With four layers of rice bran, soybean powder, purple rice powder, mushroom powder, corn powder, sweet potato powder and red date powder as the main raw materials, the linear programming method was used to design the layered rice bran meal replacement powder. Five kinds of layered rice bran meal replacement powder formulations were obtained under the main constraint that the dietary fiber content was not less than 13% of the total quality, and the price was not higher than six yuan/share. The optimal formulation was further determined by sensory evaluation, hydration characteristics and comparison of free radical clearance. Results showed that: The optimal formula contained rice bran 1# 30 g, rice bran 2# 30 g, rice bran 3# 98.68 g, rice bran 4# 34 g, soybean powder 22 g, purple rice powder 26 g, mushroom powder 14 g, corn powder 10 g, sweet potato powder 18 g, red jujube powder 30 g. The optimal formula had 16.03% dietary fiber content and sensory score of 80 points. At 25 and 100 ℃, the water absorption indexes of meal replacement powder were 1.07 and 1.19, water solubility were 68.46% and 71.22%, the expansion potential were 3.38 and 4.15. The free radical scavenging rates of DPPH and ABTS⁺ were 42.59% and 57.52%. The layered rice bran meal replacement powder had high dietary fiber content and strong antioxidant activity.

Key words: layered rice bran meal replacement powder; linear programming; physicochemical properties; dietary fiber; antioxidant activity

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (32072139); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目 (RC210305); 沈阳师范大学博士科研启动项目 (BS202122); 辽宁省农业攻关及产业化指导计划项目 (2019JH8/10200020)。

作者简介: 肖志刚 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: zhigang_xiao@126.com。

* 通信作者: 王鹏 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: wpeng_mail@126.com。

国际糖尿病联盟 2020 年的统计数据表明,我国糖耐量受损人群位居世界第一^[1]。主要原因是我国居民膳食纤维摄入量严重不足,而膳食纤维的摄入能够减少人体小肠对葡萄糖的吸收,延缓淀粉的水解,这对降低血胆固醇、高血脂、冠心病、高血压以及预防糖尿病均有良好的作用^[2-3]。根据全国膳食调查发现,全国居民总膳食纤维平均摄入量约为 13 g/d,而全国居民膳食营养素参考膳食纤维推荐量为 30.2 g/d,膳食纤维摄入量不足是导致国民糖尿病、高血糖等慢性疾病发生率逐年增长的一个重要原因^[4]。

米糠富含大量的膳食纤维和其他多种营养功能因子,具有预防人体心血管疾病、调节血压和控制血糖等多种对人体健康有益的作用^[5]。麦稻智慧粮食有限公司使用了新型碾米机,碾下的米糠是通过砂带与碾米室之间的缝隙并随着砂带运动方向自动排出的四层米糠,新型碾米机具有碾磨温度低、无杂质(含杂率<0.1%)的特点,这克服了传统碾米工艺在碾磨过程中存在的内部米温高、压力大、米糠受热而引起的各项理化指标改变、短时间内极易酸败变质的技术难题,因此得到的米糠具有更好的稳定性。然而,由于米糠表面粗糙、口感较差而导致其不能被直接食用,因此,以米糠为原料进一步开发出营养代餐粉将能够促进米糠的消费并使之成为未来快捷食品的热点。

线性规划法(LP)属于运筹学中的一种最实用的求解方法^[6],将它应用到产品的配方设计中,能够优化出满足多种限制条件的最佳配方。王步江等^[7]利用线性规划法优化以红小豆为主要原料、营养价值符合“四组四低”且成本最低的老年营养食品配方。刘孟宜等^[8]通过分析 10 种小麦品种对馒头品质的影响,进而利用线性规划法确定了馒头专用粉。马宁等^[9]采用线性规划法优化出了谷物杂粮粉的配比,进一步采用挤压膨化工艺制成食用菌复配即食杂粮粉。本文以四层米糠为原料,辅以大豆粉、紫米粉、香菇粉、玉米粉、红薯粉和红枣粉,通过喷雾干燥技术制备米糠营养代餐粉,制备的米糠代餐粉携带方便,不仅能满足人体的每日营养的正常需求,还能满足每日膳食纤维的摄入量,对糖尿病、高血压患者有极大的帮助。并进一步利用线性规划法,以膳食纤维含量不低于总质量 13% 且价格不得高于 6 元/份的为主要约束条件,对代餐粉的配方加以优化,此外,还对代餐粉进行感官评价、理化性质测定和抗氧化能力分析,为高膳食纤维分层米糠代餐粉深入研究提供参考价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

四层米糠 由麦稻智慧粮食有限公司提供;大豆粉、紫米粉、香菇粉、玉米粉、红薯粉、红枣粉 市售。

Scientz-150 高压均质机 宁波新芝生物科技股

份有限公司;SD-1500 实验型喷雾干燥机 上海沃迪科技有限公司;UV-5100 型紫外分光光度计 上海元析仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米糠代餐粉的制备流程 10 种原料→加水制浆→50 目筛过滤→高压均质→喷雾干燥。

1.2.2 米糠代餐粉操作要点 将四层米糠记为米糠 1#、2#、3#、4#,大豆粉、紫米粉、香菇粉、玉米粉、红薯粉和红枣粉按一定的比例混匀,加入料液比 1:20 g/mL 的蒸馏水搅拌均匀制成浆液,用 50 目筛进行过滤浆液,然后经过高压均质(400 MPa, 5 min)和喷雾干燥处理(喷雾压力 0.25 MPa、进料流量 450 mL/h、进风温度 160 ℃、热风流量 50 m³/h),即可得到米糠代餐粉。

1.2.3 线性规划法配方设计 根据配方的科学性、经济性和可操作性等设计原则^[10-11],采用线性规划法进行分层米糠代餐粉的配方设计,中国居民膳食营养素适宜摄入量参照《中国食物成分表》^[12]。

线性规划方法具体如下:设 X_i 为配方中各原料所用质量, X_1 为米糠 1#、 X_2 为米糠 2#、 X_3 为米糠 3#、 X_4 为米糠 4#、 X_5 为大豆粉、 X_6 为紫米粉、 X_7 为香菇粉、 X_8 为玉米粉、 X_9 为红薯粉、 X_{10} 为红枣粉,以产品价格的最小值为目标函数,方程如下:

目标函数:

$$F(\min)=0.00126X_1+0.00126X_2+0.00126X_3+0.00126X_4+0.038X_5+0.05X_6+0.05X_7+0.024X_8+0.024X_9+0.038X_{10}$$

约束条件:

a.能量:

$$350.32X_1+356.32X_2+363.80X_3+360.91X_4+390.00X_5+346.00X_6+274.00X_7+384.00X_8+61.00X_9+276.00X_{10} \geq 104000;$$

b.蛋白质:

$$14.04X_1+14.26X_2+15.58X_3+18.20X_4+35.00X_5+8.30X_6+20.00X_7+8.70X_8+0.70X_9+3.20X_{10} \geq 2600;$$

c.脂肪:

$$16.82X_1+17.98X_2+16.30X_3+14.81X_4+16.00X_5+1.70X_6+1.20X_7+3.80X_8+0.20X_9+0.50X_{10} \geq 2890;$$

d.碳水化合物:

$$22.72X_1+22.48X_2+29.22X_3+29.47X_4+34.20X_5+75.10X_6+61.70X_7+73.00X_8+15.30X_9+67.80X_{10} \geq 4800;$$

e.膳食纤维:

$$25.95X_1+23.77X_2+18.95X_3+18.47X_4+15.50X_5+1.40X_6+31.60X_7+6.40X_8+3.00X_9+6.20X_{10} \geq 1000;$$

f.以四道分层米糠为主要原料,在多种线性规划的预试验中,对价格、膳食纤维含量进行综合分析,得出以下约束条件:

$$X_1 \geq 30; X_2 \geq 30; X_3 \geq 30; X_4 \geq 30; X_4 > X_{10} + 5; X_{10} > X_6 + 5; X_6 > X_5 + 5; X_5 > X_9 + 5; X_9 > X_7 + 5; X_7 > X_8 + 5; X_8 > 10.$$

1.2.4 感官评价 感官评价方法参考 GB/T 29605-2013 进行。具体操作如下:由 10 名具有食品专业背景学生组成感官评定小组,小组成员从风味、口感、色泽、溶解性四个方面对不同配方分层米糠代餐粉进行感官评价,每两组样品之间间隔 3 min^[13]。总分为 100 分,感官评价标准见表 1。

表 1 感官评价标准
Table 1 Sensory evaluation criteria

感官指标	评价标准
风味	香气浓郁,无特殊异味(17~25 分)
	有一定复合滋味,无其他异味(9~16 分)
	腥味或其他味道突出,有异味(0~8 分)
口感	入口顺滑、细腻,稠度较好(17~25 分)
	入口顺滑、溶液浓,稠度适中(9~16 分)
	入口粗糙,颗粒感严重,稠度太差(0~8 分)
色泽	光泽度好,颜色均匀(17~25 分)
	光泽度差,颜色稍不均匀(9~16 分)
	光泽度差,颜色不均匀(0~8 分)
溶解性	快速分散溶解,无结块,无沉淀(17~25 分)
	分散溶解较快,结块较少,少许沉淀(9~16 分)
	分散溶解慢,结块较多,沉淀多(0~8 分)

1.2.5 水合特性测定 参考 Heo 等^[14]的方法并略作修改。称取 0.5 g 样品于 20 mL 蒸馏水中混匀,在 25 和 100 ℃ 分别加热 30 min,10000 r/min 离心 30 min,然后将上清液在 105 ℃ 条件下烘干至恒重,质量为 $m_2(g)$;离心管内沉淀质量为 $m_1(g)$;样品质量为 $m(g)$,具体公式如下:

$$\text{吸水指数(WAI)} = \frac{m_1}{m}$$

$$\text{水溶性(WS, \%)} = \frac{m_2}{m} \times 100$$

$$\text{膨胀热(SP)} = \frac{m_1}{m \times \left(1 - \frac{\text{WS}(\%)}{100}\right)}$$

1.2.6 分散性测定 参考苟小菊等^[15]的方法,将 1.0 g 样品于锥形瓶中并加入 25 mL 蒸馏水,以 300 r/min

转速进行磁力搅拌,直至样品完全溶解,记录溶解所需时间。

1.2.7 基本成分含量测定 能量测定:参考《食品营养标签管理规范》,能量的计算公式如下:能量(kcal)=蛋白质(g)×4+脂肪(g)×9+碳水化合物(g)×4+膳食纤维(g)×2;

碳水化合物含量测定:参考《食品营养标签管理规范》,碳水化合物的计算公式如下:碳水化合物=100-蛋白质(100 g)-脂肪(100 g)-水分(100 g)-灰分(100 g)-膳食纤维(100 g)

蛋白质测定:GB/T 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定 凯氏定氮法》;

脂肪测定:GB/T 5009.6-2016《食品中脂肪的测定 索氏抽提法》;

膳食纤维测定:参照 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定 酶重量法和酶重量法-液相色谱法》^[16]进行测定。

1.2.8 DPPH 自由基清除率测定 参考 Elizabeth 等^[17]的方法对 5 组样品进行 DPPH 自由基清除率的测定。

1.2.9 ABTS⁺自由基清除率测定 参考 Liu 等^[18]的方法对 5 组样品进行 ABTS⁺自由基清除率的测定。

1.3 数据处理

实验平行测定 3 次,以平均值±标准差表示,数据利用 SPSS 软件进行统计处理,运用 LINGO 软件进行配方设计,采用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 原料的营养素含量及价格

选用四层米糠、大豆粉、紫米粉、香菇粉、玉米粉、红薯粉、红枣粉为原料,其具体营养素含量及价格见表 2。

2.2 不同约束条件下米糠代餐粉配方

根据上述约束条件,利用 LINGO 软件进行线性规划设计,即可得出下列表 3 配方一各个原料含量及价格(5.48 元)。

在膳食纤维含量不低于总质量 13% 且价格不得

表 2 原料营养成分及价格

Table 2 Nutrient composition and price of raw materials

原料	营养成分					价格(元/kg)
	能量(kcal)	蛋白质(g)	脂肪(g)	碳水化合物(g)	膳食纤维(g)	
米糠1#	350.32	14.04	16.82	22.72	25.95	1.26
米糠2#	356.32	14.26	17.98	22.48	23.77	1.26
米糠3#	363.80	15.58	16.30	29.22	18.95	1.26
米糠4#	360.91	18.20	14.81	29.47	18.47	1.26
大豆粉	390.00	35.00	16.00	34.20	15.50	38.00
紫米粉	346.00	8.30	1.70	75.10	1.40	50.00
香菇粉	274.00	20.00	1.20	61.70	31.60	50.00
玉米粉	348.00	8.70	3.80	73.00	6.40	24.00
红薯粉	61.00	0.70	0.20	15.30	3.00	24.00
红枣粉	276.00	3.20	0.50	67.80	6.20	38.00

表 3 米糠代餐粉配方一
Table 3 Rice bran meal replacement powder formula 1

原料	质量(g)
米糠1#	30.00
米糠2#	30.00
米糠3#	80.83
米糠4#	40.00
大豆粉	25.00
紫米粉	30.00
香菇粉	15.00
玉米粉	10.00
红薯粉	20.00
红枣粉	35.00
总质量	315.83

高于 6 元/份的条件下,经线性规划求解可得到另外四个配方,表 4 为利用线性规划法求解出的 4 组配方结果。

表 4 米糠代餐粉配方二、三、四、五
Table 4 Rice bran meal replacement powder formula 2, 3, 4 and 5

原料	配方二	配方三	配方四	配方五
米糠1#(g)	30.00	30.00	30.00	30.00
米糠2#(g)	30.00	30.00	30.00	30.00
米糠3#(g)	98.68	69.93	75.08	86.58
米糠4#(g)	34.00	39.00	41.00	39.00
大豆粉(g)	22.00	27.00	26.00	24.00
紫米粉(g)	26.00	31.00	31.00	29.00
香菇粉(g)	14.00	19.00	16.00	14.00
玉米粉(g)	10.00	15.00	11.00	9.00
红薯粉(g)	18.00	23.00	21.00	19.00
红枣粉(g)	30.00	35.00	36.00	34.00
总质量(g)	312.68	318.93	317.08	314.58
价格(元)	4.89	5.98	5.70	5.26

由表 3 和表 4 可知,在满足人体基本营养成分正常摄入的条件下,配方二最为经济,价格为 4.89 元/份,且四道米糠总质量可达该配方总质量的 62%,其次价格较低的还有配方五为 5.26 元/份,价格最高为配方三为 5.98 元/份。

2.3 不同配方分层米糠代餐粉的感官品质

图 1 为分层米糠代餐粉的 5 个配方感官品质,分别从风味、口感、色泽、溶解性、整体认可度五个

方面对 5 个配方进行综合感官评价^[19],从图 1 中可以看出,在产品风味方面,配方五评分最高,其次是配方三,这两组配方感官评分均达到 20 分以上,配方一的风味最差。配方二的口感最佳,配方一和配方五次之。配方三在色泽和溶解性方面均优于其他 4 组,配方五的色泽和溶解性则较差。5 组配方整体认可度评分由大到小为:配方二>配方一>配方五>配方四>配方三。

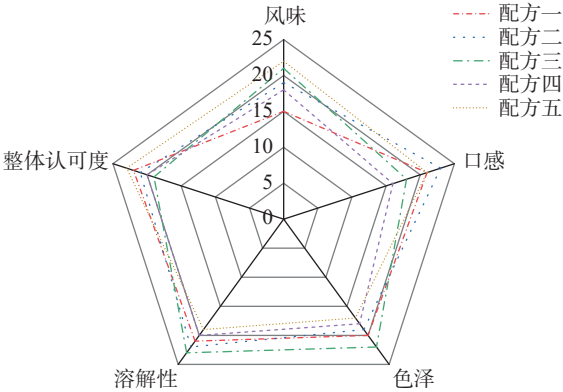


图 1 不同配方分层米糠代餐粉的感官品质

Fig.1 Sensory quality of layered rice bran meal replacement powder with different formulations

2.4 不同配方分层米糠代餐粉的水合特性

吸水指数、水溶性和膨胀势是反映产品水合作用的重要参数^[20-22]。水溶性是判断代餐粉在水中溶解速度的品质指标,水溶性越大,产品的溶解速度就越快^[23-24]。膨胀势与淀粉糊化过程中的吸水特性以及糊化后的持水能力密切相关^[25],膨胀势越大,其在人体肠道内所占的体积也就越大,这能够增加人体的饱腹感,从而更适合减肥人群^[26]。

从表 5 中可以看出,在 25 ℃ 时,配方五的吸水指数高于其他四个配方,配方二和配方四的水溶性较高,膨胀势最高的是配方二;100 ℃ 时,配方五吸水指数最高,水溶性最高的是配方四,其次配方一和配方二,配方五水溶性最低,而配方三的膨胀势最高。综合得出配方二的吸水指数、水溶性和膨胀势整体优于其他配方。

2.5 不同配方分层米糠代餐粉的抗氧化能力

分层米糠代餐粉的抗氧化能力是评价产品功能特性的一个重要指标。图 2 为五组配方的 DPPH 自

表 5 不同配方分层米糠代餐粉的水合特性(25、100 ℃)

Table 5 Hydration characteristics of layered rice bran meal replacement powder with different formulations (25, 100 ℃)

配方	吸水指数		水溶性(%)		膨胀势	
	25 ℃	100 ℃	25 ℃	100 ℃	25 ℃	100 ℃
配方一	1.03±0.02 ^b	1.25±0.05 ^{bc}	67.93±0.24 ^b	71.13±0.24 ^b	3.20±0.05 ^b	4.34±0.20 ^{ab}
配方二	1.07±0.02 ^b	1.19±0.05 ^{cd}	68.46±0.29 ^a	71.22±0.21 ^b	3.38±0.09 ^a	4.15±0.20 ^{ab}
配方三	1.08±0.04 ^{ab}	1.32±0.05 ^{ab}	67.81±0.31 ^b	70.51±0.26 ^c	3.34±0.08 ^a	4.49±0.19 ^a
配方四	1.03±0.02 ^b	1.11±0.05 ^d	68.80±0.26 ^a	72.21±0.31 ^a	3.30±0.05 ^{ab}	4.00±0.21 ^b
配方五	1.12±0.04 ^a	1.37±0.06 ^a	65.69±0.35 ^c	68.53±0.25 ^d	3.26±0.08 ^{ab}	4.34±0.21 ^{ab}

注:同一列中不同字母表示差异性显著, $P<0.05$ 。

表 6 不同配方分层米糠代餐粉的分散性及膳食纤维含量

Table 6 Dispersibility and dietary fiber content of layered rice bran meal replacement powder with different formulations

	配方一	配方二	配方三	配方四	配方五
分散性(s)	27.88±1.43 ^a	24.57±1.87 ^{ab}	25.09±1.91 ^{ab}	26.10±1.46 ^{ab}	22.94±1.82 ^b
膳食纤维含量(%)	14.82±0.84 ^{ab}	16.03±0.62 ^a	13.46±0.86 ^b	15.36±0.86 ^{ab}	13.31±0.97 ^b

注: 同一行中不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

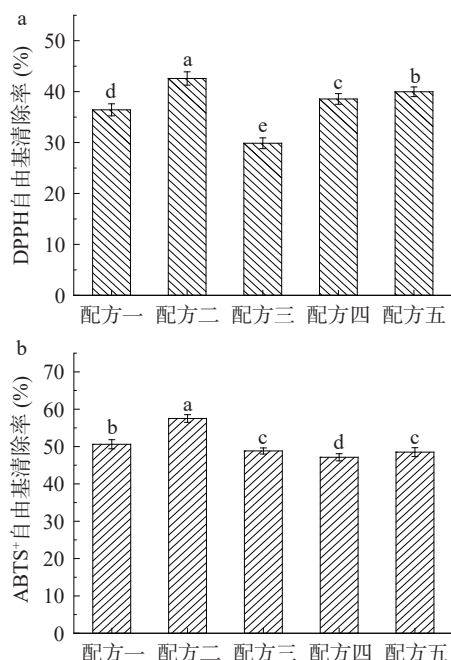


图 2 不同配方分层米糠代餐粉的抗氧化性

Fig.2 Antioxidant activity of layered rice bran meal replacement powder with different formulations

注: 不同小写字母表示差异性显著, $P < 0.05$ 。

由基和 ABTS⁺自由基清除率测定结果。

研究表明, 外源的抗氧化剂具有清除活性氧及自由基的功效, 进而防止氧化应激给人体带来损伤^[27-28]。由图 2 可知, 在分层米糠的五组配方中, 配方二的 DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺自由基清除率为 42.59% 和 57.52%, 均高于其他四组配方, 这可能由于配方二中各原料间成分互补, 并且酚类物质含量最多, 而抗氧化性与酚类物质呈正相关, 因而使得分层米糠代餐粉具有更高的 DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺自由基清除率。五组配方中, 配方三的 DPPH 自由基清除率最低, 配方四的 ABTS⁺自由基清除率也较低。因此配方二的抗氧化能力整体优于其他配方。

2.6 不同配方分层米糠代餐粉的分散性及膳食纤维含量

分散性是评估粉体溶解性的主要标准^[29]。由表 6 可知, 配方五和配方二的分散时间较少, 说明这两种配方分散性好即易于溶解。膳食纤维是一种不易被消化的营养物质^[30], 虽然它在人体内几乎不被胃肠道中的消化酶水解, 但具有控制血糖生成的作用, 并促进人体胃肠道蠕动、增强饱腹感。配方二膳食纤维含量占 16.03%, 较其他配方含量最高, 不仅能够

满足人体每日膳食纤维摄入量, 还能使人体更加有饱腹感。

3 结论

利用线性规划法, 在膳食纤维含量不低于总质量 13% 且价格不得高于 6 元/份的约束条件下, 获得了高膳食纤维分层米糠代餐粉配方, 并进一步优化得到五个较好配方, 在这些配方中, 配方二的膳食纤维含量最高且价格最低, 感官评分、水合特性和分散性相对较好, 此外, 配方二还具有最高的抗氧化能力, 因此, 综合来看配方二为高膳食纤维分层米糠代餐粉的最佳配方, 最佳基础配方为: 米糠 1# 30 g、米糠 2# 30 g、米糠 3# 98.68 g、米糠 4# 34 g、大豆粉 22 g、紫米粉 26 g、香菇粉 14 g、玉米粉 10 g、红薯粉 18 g、红枣粉 30 g。

参考文献

- [1] CAO Y, CHEN C, CUI L, et al. A population-based survey for dietary patterns and prediabetes among 7555 Chinese adults in urban and rural areas in Jiangsu Province[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 311-321.
- [2] BIRKETVEDT G S, AASETH J, FLORHOLMEN J R, et al. Long-term effect of fibre supplement and reduced energy intake on body weight and blood lipids in overweight subjects[J]. *Acta Medica*, 2000, 43(4): 129-132.
- [3] GIACCO R, CLEMENTE G, RICCARDI G. Dietary fiber in treatment of diabetes: Myth or reality?[J]. *Digestive and Liver Disease*, 2002, 34: s140-s144.
- [4] 胡云峰, 王晓彬, 魏增宇, 等. 基于线性规划法的高膳食纤维馒头粉的研究[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(3): 75-79. [HU Y F, WANG X B, WEI Z Y, et al. Research on grains steamed bread flour with high dietary based on linear programming[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(3): 75-79.]
- [5] IRAKLI M, KLEISIARIS F, MYGDALIA A, et al. Stabilization of rice bran and its effect on bioactive compounds content, antioxidant activity and storage stability during infrared radiation heating[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 80: 135-142.
- [6] 耿德志. 线性规划求解算法研究[J]. *软件导刊*, 2011, 10(6): 48-50. [GENG D Z. Research on solving algorithm of linear programming[J]. *Software Guide*, 2011, 10(6): 48-50.]
- [7] 王步江, 刘金福, 肖萍. 红小豆老年食品配方优化及营养评价[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(8): 62-65. [WANG B J, LIU J F, XIAO P. Formulation optimization and nutritional evaluation of geriatric food with red beans[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(8): 62-65.]
- [8] 刘孟宜, 王滢颖, 周湘寒, 等. 基于线性规划法制备馒头专用粉的研究[J/OL]. *中国粮油学报*: 1-15[2021-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210707.0927.004.html>. [LIU M Y, WANG Y Y, ZHOU X H, et al. Preparation of steamed bread

- special flour based on linear programming[J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021: 1–15[2021-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210707.0927.004.html>.]
- [9] 马宁, 仇莉丽, 章泽华, 等. 食用菌复配即食杂粮粉的营养品质及特征风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 251–258. [MA N, QIU L L, ZHANG Z H, et al. Analysis of nutritional quality and characteristic flavor composition of edible mushrooms compound instant coarse cereal flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 251–258.]
- [10] 李建芳, 严佩峰, 周枫, 等. 全营养冻干方便米饭的配方设计与研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 49–53. [LI J F, YAN P F, ZHOU F, et al. Formulation design and study of whole nutrition freeze-dried instant rice[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 49–53.]
- [11] 崔春红. 线性规划法在动物饲料配方优化设计中应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7278–7282. [CUI C H. The using of linear programming in optimized design for the animal feed formulation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(12): 7278–7282.]
- [12] 杨月欣, 王光亚, 何梅, 等. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018. [YANG Y X, WANG G Y, HE M, et al. China food composition tables[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018.]
- [13] CHENG H, CHEN J L, CHEN S G, et al. Sensory evaluation, physicochemical properties and aroma-active profiles in a diverse collection of Chinese bayberry (*Myrica rubra*) cultivars[J]. Food Chemistry, 2016, 212(Dec.1): 374–385.
- [14] HEO S, JEON S, LEE S. Utilization of *Lentinus edodes* mushroom β -glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(2): 627–631.
- [15] 苟小菊, 刘冬, 杨曦, 等. 热风干燥温度对新疆红肉苹果粉品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 87–93. [GOU X J, LIU D, YANG X, et al. Effect of drying temperature on the quality of apple powder made from red-fleshed apples grown in Xinjiang[J]. Food Science, 2018, 39(21): 87–93.]
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 22224-2008 食品中膳食纤维的测定 酶重量法和酶重量法-液相色谱法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T 22224-2008 Determination of dietary fiber in foods—Enzymatic gravimetric method and enzymatic gravimetric method-liquid chromatography[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.]
- [17] ELIZABETH G J, ANITA R, STEPHEN B, et al. Development of an in silico model of DPPH $\cdot$ free radical scavenging capacity: Prediction of antioxidant activity of coumarin type compounds[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(6): 881.
- [18] LIU X T, LIU J B, ZHANG W Q, et al. Electron beam irradiation-induced structural changes increase the antioxidant activities of egg white protein[J]. LWT- Food Science and Technology, 2019, 111(6): 846–852.
- [19] 程建凯, 李文钊, 刘楚海, 等. 酵母抽提物对发酵苹果汁风味品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–9 [2021-12-22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028324>. [CHENG J K, LI W Z, LIU C H, et al. Effect of yeast extract on flavor quality of fermented apple juice[J/OL]. Food and Fermentation Industries: 1–9[2021-12-22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028324>.]
- [20] LI J L, SHIN G H, LEE I W, et al. Soluble starch formulated nanocomposite increases water solubility and stability of curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 56: 41–49.
- [21] CALLIOPE S, WAGNER J, SAMMAN N. Physicochemical and functional characterization of potato starch (*Solanum tuberosum* ssp. *andigenum*) from the quebrada de Humahuaca, Argentina[J]. Starch-Starke, 2020, 72(1–2).
- [22] YE J P, HU X T, LUO S J, et al. Properties of starch after extrusion: A review[J]. Starch-Starke, 2017, 70(11–12).
- [23] PRATAMA F, PARWIYANTI. Impact of dry-and hydro-thermal treatments on swelling power, water absorption and water solubility on red-rice flours[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2018, 20(3): 227–232.
- [24] 孙震曦, 木泰华, 马梦梅, 等. 不同种类甘薯淀粉混合对其物化特性及粉条品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 77–85. [SUN Z X, MU T H, MA M M, et al. Effects of the mixture starches from different sweet potato varieties on the physicochemical characteristics and quality properties of starch noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 77–85.]
- [25] KIM J, LEE S M, BAE I Y, et al. (1-3)(1-6)- β -glucan-enriched materials from *Lentinus edodes* mushroom as a high-fibre and low-calorie flour substitute for baked foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(10): 1915–1919.
- [26] 郝竞霄, 石福磊, 惠靖茹, 等. 普通粉碎与超微粉碎对茶树菇粉体加工物理特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 95–100. [HAO J X, SHI F L, HUI J R, et al. Effects of common grinding and ultrafine grinding on physical properties of *Agrocybe cylindracea* powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(3): 95–100.]
- [27] SECK I, HOSU A, CIMPOI U C, et al. Phytochemicals content, screening and antioxidant/pro-oxidant activities of *Carapa procera* (barks) (Meliaceae)[J]. South African Journal of Botany, 2020, 131: 369–376.
- [28] 束文秀, 吴祖芳, 翁佩芳, 等. 植物乳杆菌和发酵乳杆菌对胡柚汁发酵品质及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 152–158. [SHU W X, WU Z F, WENG P F, et al. Comparison of quality characteristics and antioxidant activity of the fruit juice of *Citrus paradisi* cv. changshan huyou fermented by *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentum*[J]. Food Science, 2019, 40(2): 152–158.]
- [29] 戴晓慧, 张名位, 马永轩, 等. 蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 200–209, 156. [DAI X H, ZHANG M W, MA Y X, et al. Extrusion pretreated by steam conditioning accompanying starch enzymolysis improved the dispersibility and predigestion of instant rice flour[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 200–209, 156.]
- [30] 李宁, 江骥, 胡蓓. 膳食纤维对营养素吸收的影响[J]. 食品科学, 2006(10): 588–592. [LI N, JIANG J, HU B. Effect of dietary fiber on nutrients absorption[J]. Food Science, 2006(10): 588–592.]