

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90042

# 马齿苋复配米工艺优化及抗氧化活性研究

## Optimization of process parameters and antioxidant activity of purslane compound rice

戚家慧 陈善峰 闫玉红 韩 风 刘新华 李瑞红

QI Jia-hui CHEN Shan-feng YAN Yu-hong HAN Feng LIU Xin-hua LI Rui-hong

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

**摘要:**目的:制备具有抗氧化特性的马齿苋复配米。方法:以碎米粉为主要原料,马齿苋为辅料。在单因素试验的基础上,以综合得分为指标,设计响应面试验,优化螺杆转速、挤压温度、马齿苋添加量和水分含量工艺参数,并通过 DPPH 自由基和 ABTS 自由基的清除率检测复配米的抗氧化特性。结果:制备马齿苋复配米的最佳工艺参数为螺杆转速 140 r/min,挤压温度 120 °C,马齿苋添加量 15.5%,水分含量 27%,此工艺参数下复配米综合得分为 86.13。马齿苋复配米对 DPPH 自由基和 ABTS 自由基的清除率分别为 92.37%,85.15%,均显著高于市售米。结论:马齿苋复配米具有良好的抗氧化特性。

**关键词:**马齿苋;复配米;工艺优化;抗氧化

**Abstract:** Objective: Preparation of *Portulaca oleracea* compound rice with antioxidant properties. Methods: Broken rice flour is the main raw material and *Portulaca oleracea* L. was the auxiliary material. On the basis of single factor experiment, response surface experiment was designed with comprehensive score, and the technological parameters of screw speed, barrel temperature, purslane addition and feed moisture, and the antioxidant characteristics of compound rice were detected by the clearance of DPPH and ABTS. Results: The results showed that the optimal formula for preparing purslane compound rice was the follow: The screw speed was 140 r/min, barrel temperature was 120 °C, purslane addition was 15.5%, and the feed moisture was 27%. Under the optimal conditions, compound rice has a comprehensive score of 86.13. The DPPH and ABTS clearance

rates of purslane compound rice were 92.37% and 85.15%, respectively, which were significantly higher than those of commercial rice. Conclusion: Purslane compound rice has good antioxidant properties.

**Keywords:** purslane; compound rice; process optimization; antioxidant capacity

挤压重组米是以碎米为主要原料,在挤压机的高温高压作用下粉碎、混合、制粒、干燥,最终形成类似于大米形状的新结构米粒。碎米是大米在抛光过程中产生的副产品,其化学成分与普通米粒相似,且膳食纤维、植酸和 B 族维生素的含量都高于普通米粒<sup>[1]</sup>,而价格仅为普通米粒的 1/3~1/2。但碎米多数用作于饲料或制造糖、酒、醋的原料<sup>[2-4]</sup>,附加值较低。

马齿苋又名五行草、长命菜,被世界卫生组织称为世界上使用最广泛的药用植物之一,也是中国卫生部指定的药食同源物之一。马齿苋含有丰富的多糖、黄酮、生物碱等多种生物活性物质,具有抗氧化、抗衰老、降血糖、降血脂等功效<sup>[5]</sup>。多糖是马齿苋生物活性物质的主要成分,能够调节机体免疫、抗肿瘤、降血脂、抗氧化。目前关于马齿苋产品的研究主要有马齿苋面包<sup>[6]</sup>、马齿苋凉茶<sup>[7]</sup>、马齿苋饮料<sup>[8]</sup>、马齿苋香肠<sup>[9]</sup>等。但是马齿苋作为添加物在挤压加工方面的研究还相对较少。Rayan 等<sup>[10]</sup>利用单螺杆挤压机研究了不同水分含量和挤压温度下的马齿苋挤出物。因单螺杆挤压机具有操作困难,产品稳定性差等特点<sup>[11]</sup>,故试验采用双螺杆挤压机研究马齿苋复配米的相关性质。

研究拟以碎米为主要原料,辅以马齿苋粉,采用双螺杆挤压机重组技术制成马齿苋复配米。通过考察螺杆转速、挤压温度、马齿苋添加量和水分含量对马齿苋复配米多糖含量和感官的影响,优化工艺参数,为制备具有抗氧

基金项目:科技部“十三五”国家重点研发计划重点专项(编号:2016YF-D0401303)

作者简介:戚家慧,女,山东理工大学在读硕士研究生。

通信作者:陈善峰(1972—),男,山东理工大学教授,博士。

E-mail: csf72@126.com

收稿日期:2021-12-06

化特性的复配米提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

#### 1.1.1 材料与amp;试剂

马齿苋(粗蛋白 16.6%、膳食纤维含量 41.58%、脂肪 4.51%、马齿苋多糖 144.41 mg/g)、碎米(淀粉含量 71.2%、粗蛋白 7.3%、脂肪 1.43%);市售;

单硬脂酸甘油酯:食品级,山东优索化工科技有限公司;

ABTS、DPPH:试剂级,上海源叶生物技术有限公司;  
乙醇、浓硫酸等其他试剂均为分析纯。

#### 1.1.2 仪器与amp;设备

双螺杆挤压机:UVTE36-24 型,长沙创享食品科技有限公司;

冷冻干燥机:FD-1 型,北京博医康实验仪器有限公司;

酶标仪:SP-Max2300A2 型,上海闪普生物科技有限公司;

色差计:CM-3600A 型,日本柯尼卡美能达控股公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 马齿苋复配米的制备 将马齿苋粉和碎米粉按比例混合均匀后,加入 0.6%的单硬脂酸甘油酯,进行挤压膨化、切割造粒工序,获得产品。工艺流程:

马齿苋干叶、碎米→粉碎过筛→加 0.6%单硬脂酸甘油酯→混料→双螺杆挤压膨化→切割造粒→成品

操作要点:① 原料粉碎后均过 80 目筛;② 固体喂料速度 15 kg/h, II 区 60 ℃、III 区 90 ℃, V 区 50 ℃、VI 区 50 ℃,切刀转速 1 500 r/min;③ 螺杆转速 120 ~ 160 r/min;④ 挤压温度 90~130 ℃;⑤ 水分含量 21%~29%;⑥ 马齿苋添加量(碎米粉替代率)4%~20%;⑦ 挤压成型的样品放置于 50 ℃的烘箱中,直至水分降至 14% 以下,装入密封袋中,备用。

#### 1.2.2 单因素试验

(1) 螺杆转速:固定挤压温度 110 ℃,水分含量 25%,马齿苋添加量 12%,考察螺杆转速(120,130,140,150,160 r/min)对多糖含量和感官的影响。

(2) 挤压温度:固定螺杆转速 140 r/min,水分含量 25%,马齿苋添加量 12%,考察挤压温度(90,100,110,120,130 ℃)对多糖含量和感官的影响。

(3) 水分含量:固定螺杆转速 140 r/min,挤压温度 110 ℃,马齿苋添加量 12%,考察水分含量(21%,23%,25%,27%,29%)对多糖含量和感官的影响。

(4) 马齿苋添加量:固定螺杆转速 140 r/min,挤压温度 110 ℃,水分含量 25%,考察马齿苋添加量(4%,8%,12%,16%,20%)对多糖含量和感官的影响。

1.2.3 响应面试验 根据单因素试验结果,以综合得分为响应值,选取螺杆转速、挤压温度、马齿苋添加量、水分含量 4 个因素,设计四因素五水平二次正交旋转组合试验,优化加工工艺。

1.2.4 色差测定 参照文献[12]。

1.2.5 感官评分 米粒感官评价参照文献[13],评分标准见表 1。熟米感官评价参照文献[14],评分标准见表 2。按式(1)和式(2)计算样品感官评分和感官综合得分。

$$A = r_1 \times 30\% + r_2 \times 70\%, \quad (1)$$

$$B = A \times 70\% + W_1 \times 30\%, \quad (2)$$

式中:

A——感官评分;

$r_1$ ——米粒感官评分;

$r_2$ ——米饭感官评分;

B——感官综合得分;

$W_1$ ——白度。

1.2.6 多糖含量测定 参照薛沾枚<sup>[15]</sup>的方法并作修改。精确称取 1 g 样品,以蒸馏水为提取溶剂,在液料比为 20:1 (mL/g)条件下,超声辅助提取 50 min,提取液中加入 4 倍体积 95%乙醇,在 4 ℃下醇沉 24 h。去除醇沉提取液的上清液,通过离心得到沉淀(3 500 r/min,10 min),最后冷冻干燥得到粗多糖。采用苯酚硫酸法测多糖含量。采用线性插值法计算得分。最大值定义为 10 分,最小值定义为 1 分。最终结果乘以 10,换算为百分制。

1.2.7 综合评分法 根据式(3)计算综合得分。

$$S = B \times 0.4 + P \times 0.6, \quad (3)$$

式中:

S——综合得分;

表 1 米粒感官评分

Table 1 Sensory score of rice grains

评分项目	评分标准
米粒形状	米粒完整有大米形状,大小均匀,表面无裂纹(20~30分) 米粒较完整有近似大米形状,大小较均匀,表面少有裂纹(10~19分) 米粒破损,大小不均匀,表面裂纹较多(0~9分)
米粒色泽	米粒具有其应有色泽且颜色均匀(15~20分) 米粒具有其应有色泽且颜色较均匀(7~14分) 米粒无光泽,颜色分布不均匀(0~6分)
米粒香气	米粒明显具有原料原有香味,清香自然(17~25分) 米粒基本具有原料原有香味,无异味(9~16分) 米粒有其他异味(0~8分)
透明度	对光观察,米粒透明(17~25分) 对光观察,米粒较透明(9~16分) 对光观察,米粒不透明(0~8分)

表 2 熟米感官评分

Table 2 Sensory score of cooked rice

一级指标	二级指标	具体特征描述与分值
气味	纯正性、浓郁性	无异味,具有马齿苋香味或米饭特有香味(15~20分)
		无明显异味,具有马齿苋香味或米饭特有香味(8~14分)
		有明显异味,无马齿苋香味或米饭特有香味(0~7分)
外观结构	颜色	米饭颜色均匀,正常(6~7分)
		米饭颜色较均匀,较正常(4~5分)
		米饭颜色不均匀(0~4分)
外观结构	光泽	米饭有明显光泽(7~8分)
		米饭稍有光泽(5~6分)
		米饭无光泽(0~5分)
外观结构	饭粒完整性	米饭结构紧密,饭粒完整性好(4~5分)
		米饭大部分结构紧密完整(3分)
		米饭出现爆花(0~2分)
适口性	黏性	米饭爽滑,有黏性,不粘牙(8~10分)
		有黏性,基本不粘牙(6~7分)
		有黏性,粘牙;或无黏性(0~5分)
适口性	弹性	米饭有嚼劲(8~10分)
		米饭稍有嚼劲(6~7分)
		米饭疏松、发硬,感觉有渣(0~5分)
适口性	软硬度	软硬适中(8~10分)
		略硬或略软(6~7分)
		很硬或很软(0~5分)
滋味	纯正性、持久性	咀嚼时有浓郁的清香、有马齿苋特有气味和甜味(22~25分)
		咀嚼时有淡淡的清香和甜味(18~21分)
		咀嚼时无明显清香、无甜味、但无异味(16~17分)
冷饭质地	成团性、黏弹性、硬度	咀嚼时无清香、有异味(0~15分)
		较松散、黏弹性较好、硬度适中(4~5分)
		结团,黏弹性稍差,稍变硬(2~3分)
冷饭质地	成团性、黏弹性、硬度	板结,黏弹性差,偏硬(0~1分)

B——感官综合得分;

P——多糖得分。

1.2.8 体外抗氧化活性分析

(1) DPPH 自由基清除率:参照文献[16]。

(2) ABTS 自由基清除率:参照文献[17]<sup>19-20</sup>。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 挤压温度对马齿苋复配米品质的影响 图 1(a)表明在固定的螺杆转速、水分含量、马齿苋添加量下,多糖含量随挤压温度的增加先上升后下降,多糖含量、感官综合得分在 120 °C 时达到最大值。杨滨梦等<sup>[18]</sup>研究表明,猴头菇多糖随挤压温度的升高呈先上升后下降的趋势,且在 120 °C 达到最大值。当挤压温度较低时,水分子因

无法剧烈运动,而与物料的相互作用受限,螺杆和物料之间的摩擦力无法传递到淀粉分子内部<sup>[17]24</sup>,马齿苋复配米颗粒不易膨胀,结构不易破坏,多糖的溶出率比较低。随着挤压温度的升高,机筒内产生高温、高压、高剪切力的反应环境,增强水分子和物料相互作用,促进复配米结构的解体,多糖的溶出率增大。当机筒温度过高时,挤压作用剧烈,水分蒸发速率加快,多糖发生降解,导致多糖含量随温度不断增大逐渐减少,但温度过高,水分发生闪蒸,使得米粒较干、对复配米的剪切制粒有影响,从而影响感官评价分数。综合考虑在 110~130 °C 进行下一步试验。

2.1.2 螺杆转速对马齿苋复配米品质的影响 图 1(b)表明在固定的挤压温度、水分含量、马齿苋添加量下,多糖、感官综合评分随螺杆转速的增加均先上升后下降,在

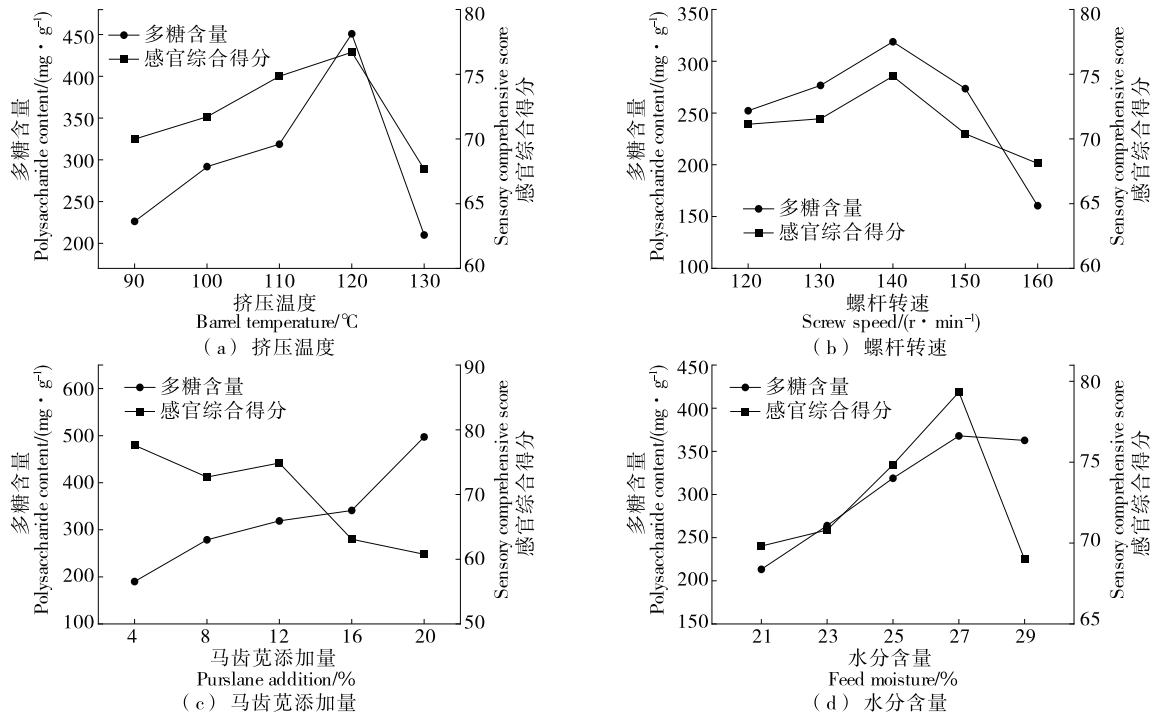


图1 单因素试验结果

Figure 1 Single factor test results

140 r/min 时达到峰值。螺杆转速影响物料在挤压机中的停留时间,进而影响挤压加工过程物料所受的高温高压作用<sup>[19]</sup>。当螺杆转速过低时,物料在机筒内停留的时间久,受到的高温高压剪切摩擦力小,热能转化得少,吸收热量不足,水分含量相对变大,膨化效果比较差。随着转速的提高,物料和螺杆之间的摩擦力增大,物料受热明显,物料的组织结构被破坏,多糖提取率增大<sup>[20-21]</sup>。当螺杆转速过高时,物料在机筒内停留的时间短,不易形成高压环境,降低挤压膨化技术对马齿苋复配米结构的改性,还会造成复配米的黏度增大、切粒结构不理想,影响感官评价得分;高速螺杆转动带来高温环境,高剪切力,多糖的结构遭到破坏,提取率降低<sup>[22]</sup>。综上,螺杆转速在 140 r/min 时,多糖含量处于较高范围,感官评价得分最高。

**2.1.3 马齿苋添加量对马齿苋复配米品质的影响** 由图 1(c) 可以看出,在固定的螺杆转速、挤压温度、水分含量下,多糖含量与马齿苋添加量呈正比,但是感官综合评分先升高后减少,在马齿苋添加量 12% 时达到峰值。这是由于马齿苋富含膳食纤维,大量添加会导致复配米的结构疏松,不可避免的影响米粒口感。马齿苋添加量较少时,随着添加量增大,复配米的弹性上升,随着马齿苋添加量的升高,弹性呈下降趋势,说明马齿苋添加量对复配米的口感效果有一定程度的削减。

**2.1.4 水分含量对马齿苋复配米品质的影响** 图 1(d) 表明在固定的螺杆转速、挤压温度、马齿苋添加量下,多糖

含量和感官评价得分随水分含量的增加均呈先上升后下降的趋势,多糖含量、感官评价得分在水分含量 27%~28% 时达到最大值。当处于低水分含量时,物料在机筒内的流动性差、挤压过程中产生的水蒸气少,不能有效破坏物料内部结构<sup>[22]</sup>,导致多糖提取率低,同时低水分使得米粒较干、对复配米的剪切制粒受影响,从而影响感官得分。随着水分含量的增加,热能传递速度加快,物料结构破坏程度加大,多糖提取率增大。但当水分含量过高,水分子蒸发带走的热能比水分子增加传递的热能多,物料的升温速度降低,多糖受到破坏,使得大分子的多糖变成小分子的糖类;水分含量过高会导致物料的流动性很大,物料所受的剪切力和摩擦力降低,糊化程度低,迫使物料未充分改性就被挤出,降低了挤压效果,导致了米粒的耐煮性较差、口感不理想,综合考虑,在水分含量 27%~28% 进行下一步试验。

## 2.2 响应面试验

在单因素试验基础上,自变量为螺杆转速、挤压温度、马齿苋添加量、水分含量,响应值为综合得分,因素水平见表 3,具体设计结果及数据见表 4。

以多元回归分析得回归方程:

$$Y = 69.23 - 0.12A + 1.21B + 12.20C + 2.71D + 0.92AB + 0.12AC + 2.27AD - 0.034BC + 1.00BD + 0.52CD - 5.27A^2 - 3.81B^2 - 1.21C^2 - 4.60D^2 \quad (4)$$

中心组合试验方差分析(表 5)得到模型的  $F$  值为

表 3 响应面试验因素水平表

Table 3 Response surface experimental factor level table

因素水平	A 螺杆转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	B 挤压温 度/℃	C 马齿苋 添加量/%	D 水分 含量/%
-2	130	110	8	25
-1	135	115	10	26
0	140	120	12	27
1	145	125	14	28
2	150	130	16	29

表 4 响应面分析的试验设计和结果

Table 4 Experimental design and results for response surface analysis

试验号	A	B	C	D	Y 综合得分
1	-1	-1	-1	-1	35.17
2	1	-1	-1	-1	34.48
3	-1	1	-1	-1	39.57
4	1	1	-1	-1	37.43
5	-1	-1	1	-1	70.00
6	1	-1	1	-1	61.91
7	-1	1	1	-1	68.83
8	1	1	1	-1	53.83
9	-1	-1	-1	1	45.84
10	1	-1	-1	1	35.54
11	-1	1	-1	1	38.02
12	1	1	-1	1	42.41
13	-1	-1	1	1	63.77
14	1	-1	1	1	67.73
15	-1	1	1	1	67.16
16	1	1	1	1	79.44
17	-2	0	0	0	48.51
18	2	0	0	0	54.89
19	0	-2	0	0	53.32
20	0	2	0	0	61.77
23	0	0	-2	0	50.82
22	0	0	2	0	85.06
23	0	0	0	-2	47.80
24	0	0	0	2	60.94
25	0	0	0	0	64.33
26	0	0	0	0	67.43
27	0	0	0	0	70.07
28	0	0	0	0	65.03
29	0	0	0	0	74.48
30	0	0	0	0	65.55
31	0	0	0	0	62.18
32	0	0	0	0	68.63
33	0	0	0	0	74.97
34	0	0	0	0	76.28
35	0	0	0	0	78.51
36	0	0	0	0	63.36

9.46,  $P < 0.01$ , 表明模型显著; 失拟项  $P > 0.05$ , 不显著, 表明该模型成立; 二次多项回归方程  $R^2 = 0.8631 > 0.5$ , 该模型模拟效果好, 因此可作为试验模型分析数据。根据方程各变量系数大小可知, 4 个因素对多糖含量的影响程度顺序为马齿苋添加量 > 水分含量 > 挤压温度 > 螺杆转速。

表 5 综合得分回归方差分析<sup>†</sup>

Table 5 Comprehensive score regression analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F	显著性
模型	5 975.11	14	426.79	9.46	<0.000 1	**
A	0.33	1	0.33	7.40E-03	0.932 3	
B	35.41	1	35.41	0.78	0.385 8	
C	3 569.48	1	3 569.48	79.10	<0.000 1	**
D	175.88	1	175.88	3.90	0.061 7	
AB	13.41	1	13.41	0.30	0.591 4	
AC	0.22	1	0.22	4.95E-03	0.944 6	
AD	82.13	1	82.13	1.82	0.191 7	
BC	0.02	1	0.02	4.19E-04	0.983 9	
BD	16.10	1	16.10	0.36	0.556 7	
CD	4.38	1	4.38	0.10	0.758 5	
A <sup>2</sup>	888.77	1	888.77	19.70	0.000 2	**
B <sup>2</sup>	464.24	1	464.24	10.29	0.004 2	**
C <sup>2</sup>	46.86	1	46.86	1.04	0.319 8	
D <sup>2</sup>	677.89	1	677.89	15.02	0.000 9	**
残差	947.66	21	45.13			
失拟项	607.67	10	60.77	1.97	0.141 4	
净误差	339.99	11	30.91			
总变异	6 922.77	35				

<sup>†</sup> \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

由图 2 可知, 沿马齿苋添加量方向比螺杆转速、挤压温度、水分含量的响应面坡度的坡度更陡, 等高线也更密集, 说明马齿苋添加量比螺杆转速、挤压温度和水分含量对马齿苋复配米影响更大, 与方差分析结果一致。挤压温度与螺杆转速、水分含量与螺杆转速和水分含量与挤压温度的等高线图呈圆形, 表明其交互不显著, 与方差分析结果一致。

响应面优化出的结果为: 螺杆转速 139.01 r/min、挤压温度 118.39 ℃、马齿苋添加量 15.48%、水分含量 27.33%, 在该工艺条件下, 综合得分为 86.29, 考虑实际, 将条件修正为螺杆转速 140 r/min、挤压温度 120 ℃、马齿苋添加量 15.5%、水分含量 27%, 在该条件在平行验证 3 次计算得到综合得分为 86.13, 与预测值接近, 表明该工艺条件具有一定的可行性。

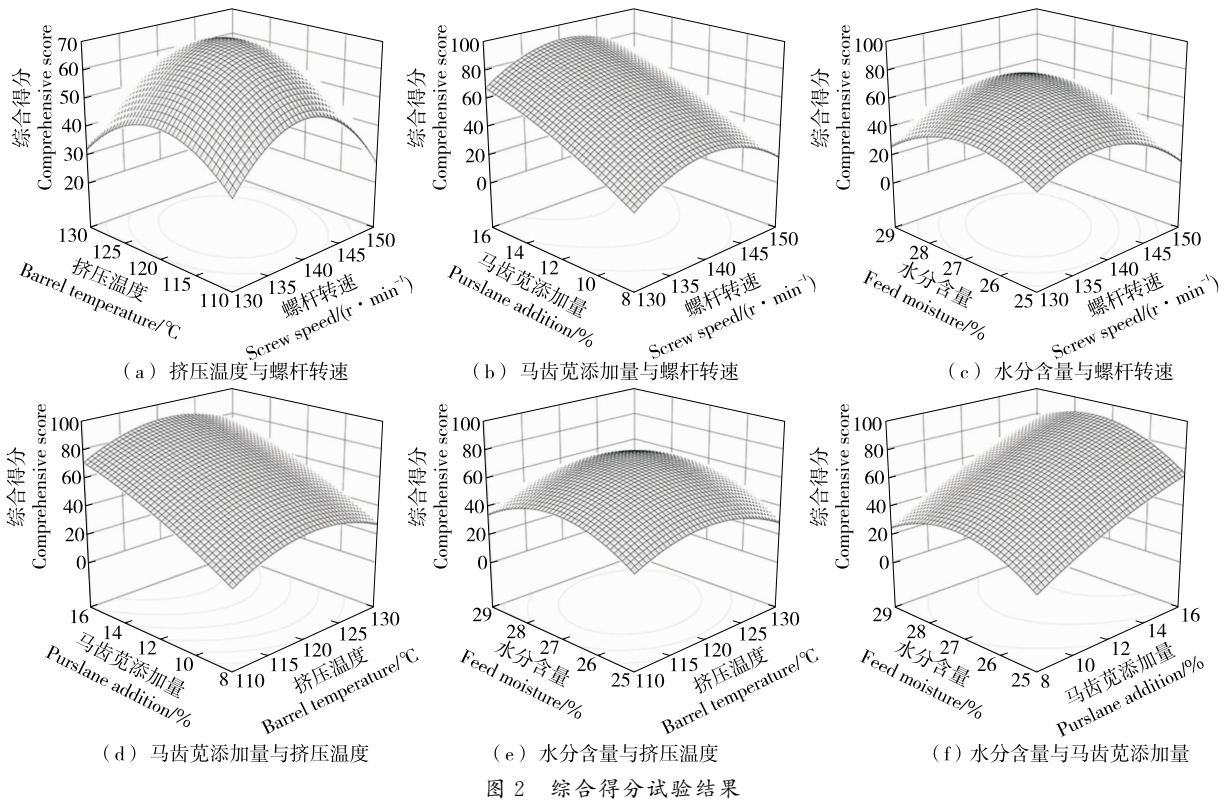


Figure 2 Comprehensive score test results

2.3 体外抗氧化试验

由图 3 可知,马齿苋复配米的抗氧化能力明显高于市售米和挤压空白米,且对 DPPH 自由基清除率高达 92.37%,对 ABTS 自由基清除率高达 85.15%,说明马齿苋复配米中马齿苋发挥了重要抗氧化作用。这是因为复配米虽然会受到高温高压作用,但是因含有多糖、多酚等活性物质,使其具有较强的抗氧化能力。Melilli 等<sup>[23]</sup>将马齿苋与小麦粉混合制作出了具有抗氧化特性的意大利面。

3 结论

试验得出马齿苋复配米的最佳工艺参数为螺杆转速

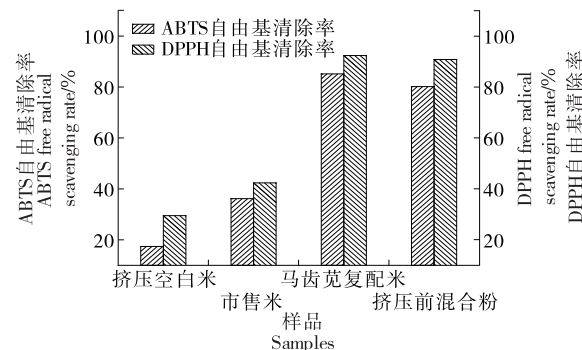


Figure 3 In vitro antioxidant test results

Figure 3 In vitro antioxidant test results

140 r/min,挤压温度 120 °C,马齿苋添加量 15.5%,水分含量 27%。在该工艺下复配米的综合得分最高。此外,体外抗氧化试验结果表明马齿苋复配米的抗氧化能力显著高于市售米。由于马齿苋本身是药食同源植物,富含多种活性物质,将其应用于挤压技术,提高马齿苋利用率的同时又丰富了营养米的市场。但是马齿苋的抗氧化机理需要进一步探索。

参考文献

[1] QHTSUBO K, SUZUKI K, YASUI Y, et al. Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2005, 18 (4): 303-316.

[2] CAI Y H, LIU Y H, LIU T Y, et al. Heterotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using broken rice hydrolysate as carbon source for biomass and pigment production[J]. Bioresource Technology, 2021, 323: 124607.

[3] MONDAL P, SADHUKHAN A K, GANGULY A, et al. Optimization of process parameters for bio-enzymatic and enzymatic saccharification of waste broken rice for ethanol production using response surface methodology and artificial neural network-genetic algorithm[J]. 3 Biotech, 2021, 11(1): 1-18.

[4] SANGNERN N, PUANGNARK T, NGUANSANGIAM W, et al. Production and development of vinegar fermentation from broken

- Riceberry rice using raw starch-degrading enzyme hydrolysis[J]. *Biotech*, 2020, 10(12): 515.
- [5] 李玉萍, 曾宪伟, 叶军, 等. 马齿苋活性成分体外抗癌作用的初步筛选[J]. *时珍国医国药*, 2009, 20(11): 2 726-2 728.
- LI Yu-ping, ZENG Xian-wei, YE Jun, et al. Screening antitumor effect of active constituents from *Portulaca oleracea* L. in vitro and in vivo[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2009, 20(11): 2 726-2 728.
- [6] MELILLI M G, DI STEFANO V, SCIACCA F, et al. Improvement of fatty acid profile in durum wheat breads supplemented with *Portulaca oleracea* L. quality traits of purslane-fortified bread[J]. *Foods*, 2020, 9(6): 764.
- [7] 臧皓, 林余波, 张露云, 等. 马齿苋凉茶的研制[J]. *通化师范学院学报*, 2019, 40(4): 15-18.
- ZANG Hao, LIN Yu-bo, ZHANG Lu-yun, et al. Development of purslane herbal tea[J]. *Journal of Tonghua Normal University*, 2019, 40(4): 15-18.
- [8] 张帅, 郑开斌, 丁子秋, 等. 马齿苋低糖抗氧化饮料的研制[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(11): 1 206-1 211.
- ZHANG Shuai, ZHENG Kai-bin, DING Zi-qiu, et al. Development of low-sugar and antioxidant beverage with purslane *Portulaca oleracea* L.[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33(11): 1 206-1 211.
- [9] 贾鸿葵, 王稳航. 马齿苋粉成分分析及其在猪肉乳化香肠中的应用[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(4): 142-146.
- JIA Hong-kui, WANG Wen-hang. Composition analysis of *Portulaca oleracea* L. powder and its application on pork emulsion sausage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(4): 142-146.
- [10] RAYAN A M, MORSY N E, YOUSSEF K. Influence of extrusion conditions on techno-functional properties, phytochemical contents and antioxidant activity of rice-based extrudates containing powder of purslane (*Portulaca oleracea* L.) and jew's mallow (*Corchorus olitorius* L.) leaves[J]. *Egyptian Journal of Food Science*, 2021, 49(1): 81-96.
- [11] 汪沐. 单螺杆和双螺杆挤压膨化机的一般比较[J]. *饲料工业*, 2006(23): 5-8.
- WANG Mu. General comparison of single screw and twin screw extruder[J]. *Feed Industry*, 2006(23): 5-8.
- [12] 祝东品. 青稞挤压膨化米制品加工工艺及品质研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 52.
- ZHU Dong-pin. Study on processing technology and quality of extruded rice products from highland barley[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019: 52.
- [13] 喻勤. 挤压重组米的配方工艺及其理化特性和血糖生成指数研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 9-10.
- YU Qin. Research on formulation, process of extruded reconstituted rice and its physical, glycemic index characteristics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 9-10.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法: GB/T 15682—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection of grain and oils—Method for sensory evaluation of paddy or rice cooking and eating quality: GB/T 15682—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [15] 薛洁枚. 马齿苋多糖的提取、抗癌活性及其颗粒剂的制备[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019: 9-16.
- XUE Zhan-mu. Extraction, anticancer activity and preparation of purslane polysaccharide granules[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019: 9-16.
- [16] 王洁洁, 邵子晗, 韩晶, 等. 挤压重组紫薯米工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 137-142, 150.
- WANG Jie-jie, SHAO Zi-han, HAN Jing, et al. Optimization of process parameters and antioxidant activity of extrusion recombinant purple sweet potato rice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 137-142, 150.
- [17] 吴春艳. 红薯及红薯叶复配营养米的研制及其品质特性分析[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
- WU Chun-yan. Preparation and properties study of sweet potato and sweet potato leaf compound nutritional rice [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.
- [18] 杨滨梦, 肖志刚, 黄丹, 等. 猴头菇多糖挤压膨化预处理提取工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(11): 78-83.
- YANG Bin-meng, XIAO Zhi-gang, HUANG Dan. Optimization of extrusion process of polysaccharide from *hericium erinaceus* by extrusion pretreatment[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(11): 78-83.
- [19] 崔维真, 陶海腾, 崔波. 双螺杆挤压过程中停留时间分布的测定及影响因素研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(4): 8-14.
- CUI Wei-zhen, TAO Hai-teng, CUI Bo. Development of residence time distribution and its influencing factors during twin screw extrusion[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(4): 8-14.
- [20] SIDDHURAJU P, MANIAN S. The antioxidant activity and free radical-scavenging capacity of dietary phenolic extracts from horse gram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) seeds[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(3): 950-958.
- [21] XIAO S, ZHANG Y Q, XIE J B, et al. Ultrasonic-assisted extraction of squalene and vitamin E based oil from *zizyphi spinosae* semen and evaluation of its antioxidant activity[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12: 2 844-2 854.
- [22] 闫征, 李双石, 杨国伟, 等. 挤压膨化预处理技术对灵芝多糖提取的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(8): 280-283, 289.
- YAN Zheng, LI Shuang-shi, YANG Guo-wei, et al. Effect of twin-screw extrusion on polysaccharide extraction from *Ganoderma lucidum*[J]. *Technology of Food Industry*, 2017, 38(8): 280-283, 289.
- [23] MELILLI M G, PAGLIARO A, SCANDURRA S, et al. Omega-3 rich foods: Durum wheat spaghetti fortified with *Portulaca oleracea*[J]. *Food Bioscience*, 2020, 37: 100730.