

紫玉米花色苷辅色配方优化 及其对紫玉米品质的影响

Optimization of anthocyanin copigmentation formula of purple corn and its effect on the quality of purple corn

庞文倩^{1,2} 于蕊^{1,3} 李大婧¹ 刘春菊¹ 白冰²

PANG Wenqian^{1,2} YU Rui^{1,3} LI Dajing¹ LIU Chunju¹ BAI Bing²

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014; 2. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110161;

3. 南京农业大学食品科学技术学院, 江苏 南京 210014)

(1. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 2. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China; 3. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

摘要:目的:探究热加工过程中紫玉米花色苷的辅色配方。方法:以果糖、单宁酸和果胶作为辅色剂,采用响应面分析法优化紫玉米花色苷的辅色配方,并以未处理的紫玉米作为对照,对不同处理后紫玉米花色苷组分、色泽、质地、滋味和抗氧化活性(DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力、铁离子还原能力)进行测定。结果:最佳辅色配方为果糖质量分数 19%、单宁酸质量分数 0.07%、果胶质量分数 1.9%。与对照组相比,经最佳配方辅色处理后紫玉米中矢车菊-3-O-葡萄糖苷、天竺葵-3-O-葡萄糖苷和芍药-3-O-葡萄糖苷含量分别增加了 77.64%、64.82%、54.75%,总花色苷含量增加了 67.98%;色泽 L^* 值、 b^* 值和 ΔE 值均下降, a^* 值增加;硬度、胶着性、咀嚼性增加,弹性、内聚性降低;苦、涩和涩的回味差异不大,酸、甜、咸、鲜、苦的回味及鲜的回味存在差异;在 0.02~0.10 mg/mL 的质量浓度范围内,紫玉米花色苷的 DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力和铁离子还原能力分别为 39%~79%, 54%~74%, 27%~67%。结论:果糖质量分数 19%、单宁酸质量分数 0.07%、果胶质量分数 1.9% 的组合对紫玉米花色苷的辅色效果最佳。

关键词:紫玉米;花色苷;组分;色泽;质地;滋味;抗氧化活性

Abstract: Objective: This study aimed to explore the

copigmentation formula of purple corn anthocyanins. **Methods:** In this study, fructose, tannic acid, and pectin were used as copigmentation. The response surface method was used to optimize the co-pigmentation formula of purple corn anthocyanins, and the untreated purple corn was used as a control test. The anthocyanin components, color, texture, taste and antioxidant activity (DPPH free radical scavenging ability, ABTS free radical scavenging ability, and FRAP iron ion reducing ability) of purple corn after different treatments were determined. **Results:** 19% fructose, 0.07% tannic acid, and 1.9% pectin had the best copigmentation effect. Compared with the control group, the contents of cyanidin-3-O-glucoside, geranium-3-O-glucoside, and peony-3-O-glucoside in purple corn increased by 77.64%, 64.82%, and 54.75%, respectively. The total anthocyanin content increased by 67.98%. The L^* value, b^* value, and ΔE value of color decreased, while the a^* value increased. Hardness, adhesiveness, and chewing type increased, while elasticity and cohesion decreased. The bitter, astringent, and astringent aftertastes differ slightly, as do the sour, sweet, salty, umami, bitter, and umami aftertastes. In the mass concentration range of 0.02~0.10 mg/mL, the DPPH free radical scavenging ability, ABTS free radical scavenging ability and FRAP iron ion reducing ability of purple corn anthocyanins were 39%~79%, 54%~74% and 27%~67%, respectively. **Conclusion:** The copigmentation effect of 19% fructose, 0.07% tannic acid, and 1.9% pectin on purple corn anthocyanins was the best.

Keywords: purple corn; anthocyanin; component; color; texture; taste; antioxidant activity

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金(编号: CX[23]1018);
江苏省苏北科技专项(编号: XZ-SZ202128)

作者简介:庞文倩,女,沈阳农业大学在读硕士研究生。

通信作者:刘春菊(1979—),女,江苏省农业科学院副研究员,博士。E-mail: cjliu0306@163.com

收稿日期:2023-06-03 **改回日期:**2024-02-25

紫玉米(*Zea mays* L.)为禾本科玉米属植物,其籽粒

和穗丝均呈紫红色^[1]。紫玉米不仅色泽独特,且因富含花色苷而备受关注。Aoki等^[2]研究发现,紫玉米色素提取物中73.3%为矢车菊-3-O-葡萄糖苷,9.3%为天竺葵-3-O-葡萄糖苷,17.5%为芍药-3-O-葡萄糖苷,其中矢车菊素及芍药素呈紫红色,天竺葵素呈红橙色,这是紫玉米色泽呈现紫红色的主要原因。花色苷是一种有效的抗氧化剂,有助于保护身体免受自由基的损害,花色苷与抗炎症、抗氧化、抗糖尿病、抗癌等有关,同时促进血液循环,调节血压,控制胆固醇水平等^[3-4]。

紫玉米花色苷的性质很不稳定,除了受本身结构的影响外,温度、pH值、光照、氧气、过氧化物和辅色剂等因素也都易使花色苷的稳定性发生改变。当花色苷溶液受热时,花色苷黄盐阳离子(红色)平衡向着查耳酮C(无色)和假碱B(无色)方向移动,使花色苷黄盐阳离子(红色)减少,花色苷含量降低^[5]。添加辅色剂可以有效提高紫玉米花色苷的稳定性,其原理主要是通过花色苷与辅色剂间的共色作用来减缓花色苷的降解速率^[6]。糖作为辅色剂降低了紫玉米的水分活度,导致紫玉米花色苷的降解反应速率下降,生成假碱式结构的速度减慢,从而使花色苷得到了保护^[7]。有机酸中的羟基与花色苷中的黄阳盐离子发生分子间非共价键辅色作用,提高了花色苷的稳定性,或者有机酸与花色苷之间相互作用保护发色团免受亲核攻击,从而提高了花色苷的稳定性^[8]。花色苷黄阳盐离子和果胶游离羧基之间的离子相互作用,以及花色苷的芳环堆积作用提高了花色苷的稳定性^[9]。管敬喜等^[10]研究发现,10%果糖对毛葡萄皮渣的花色苷有辅色作用,10%果糖处理后毛葡萄皮渣花色苷的吸光值比对照组高;楼乐燕等^[11]研究发现,随着单宁酸浓度的增加,杨梅花色苷最大吸收波长发生红移,花色苷稳定性明显提高;麦日艳古·亚生等^[12]研究发现,果胶通过与花色苷分子间的相互作用提高了果汁花色苷体系的稳定性。

研究在前期单因素试验的基础上,拟以紫玉米为研究对象,优化以果糖、单宁酸和果胶为辅色剂的辅色配方,以期为提高紫玉米花色苷稳定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试剂

紫玉米:苏科糯1505,江苏省农业科学院;
无水乙醇、盐酸、氯化钾、无水乙酸钠、磷酸、氯化铁、过硫酸钾、乙酸、氢氧化钠、甲醇、抗坏血酸:食品级,国药集团化学试剂有限公司;

果糖、单宁酸、果胶:食品级,河南万邦化工科技有限公司。

1.2 主要仪器

液相色谱仪:Agilent 1200型,美国安捷伦科技有限公司;

手提式高压蒸汽杀菌器:XFS-280MB型,上海申安

医疗器械厂;
电热恒温水槽:DK-8D型,上海一恒科技有限公司;
分光测色仪:CM-700d1型,上海精密科学仪器有限公司;
酶标仪:ELX-808IU型,美国伯腾仪器有限公司;
研磨机:A-11-B-S025型,德国IKA集团/艾卡(广州)仪器设备有限公司;
台式高速离心机:TG16-WS型,长沙湘仪离心机仪器有限公司;
pH计:FE20型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;
超声波粉碎机:JY 92-II型,宁波新芝生物科技股份有限公司;
电子舌系统:ASTREE型,法国Alpha MOS公司;
千分之一天平:JA-3003型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;
海尔电冰柜:DC/BD-379H型,海尔集团海尔电冰箱有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 紫玉米于乳熟期采收,要求紫玉米颗粒饱满,色泽、形状相似,无病虫害,无机械损伤。将紫玉米先后置于果糖溶液和单宁酸溶液中各浸渍30 min,再于其表面涂抹果胶溶液,待控干水分后,将处理后的紫玉米在120℃下热加工30 min,对紫玉米随机取粒进行指标测定,每组处理为3根形状大小相似的紫玉米。
1.3.2 试验设计 在前期单因素试验的基础上,采用响应面分析法设计试验,以果糖、单宁酸和果胶质量分数为自变量,如表1所示,以综合评分为响应值,设计17组处理方式,通过响应面分析进行紫玉米花色苷最佳组合配方的优化。

表1 响应面分析因素及水平
Table 1 Factors and levels of response surface analysis

水平	A 果糖质量 分数/%	B 单宁酸质量 分数/%	C 果胶质量 分数/%
—1	10	0.04	1.5
0	15	0.06	2.0
1	20	0.08	2.5

1.3.3 总花色苷提取和测定 采用pH示差法^[13]测定紫玉米花色苷含量。将处理后的紫玉米用液氮速冻,再用研磨机碾磨成均匀粉末状,准确称取1.000 g,添加20 mL无水乙醇—0.2 mol/L盐酸溶液($V_{\text{无水乙醇}}:V_{\text{盐酸}}=3:2$),于400 W超声条件下提取30 min,50℃水浴浸提60 min,4℃、8 000 r/min离心10 min,分别用pH 1.0的氯化钾缓冲液和pH 4.5的无水乙酸钠缓冲液将上清液稀释10倍,常温下避光平衡15 min,再于525 nm和

700 nm 处测定花色苷吸光值,按式(1)、式(2)计算花色苷含量。

$$A = (A_{525\text{ nm}} - A_{700\text{ nm}})_{\text{pH}=1} - (A_{525\text{ nm}} - A_{700\text{ nm}})_{\text{pH}=4.5}, \quad (1)$$

$$C = \frac{A \times M_w \times D_F \times 1\,000}{\epsilon \times L}, \quad (2)$$

式中:

A ——辅色后总花色苷吸光值;

$A_{525\text{ nm}}$ ——525 nm 处总花色苷吸光值;

$A_{700\text{ nm}}$ ——700 nm 处总花色苷吸光值;

C ——辅色后提取液中总花色苷质量浓度,mg/L;

M_w ——矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷的相对分子质量,449.2;

D_F ——稀释倍数;

ϵ ——消光系数,26 900 L/(mol · cm);

L ——光程,1.0 cm。

1.3.4 花色苷组分测定

(1) 花色苷标准溶液制备:紫玉米中主要含有 3 种花色苷,分别精密称取 3 种标准品各 1.000 mg,用质量分数为 10% 盐酸甲醇溶液溶解并定容至 10 mL 容量瓶中,充分摇匀,即为 100 mg/L 标准溶液,并逐级稀释为 1.0, 12.5, 20.0, 50.0 mg/L,再用 HPLC-DAD 法测定标准溶液的标准曲线,于 -20 °C 下密闭的棕色玻璃瓶中,保存有效期为 6 个月。

(2) 紫玉米花色苷的标准曲线绘制及含量测定:采用 HPLC-DAD 法对紫玉米花色苷提取液进行含量测定,分析柱为 Agilent-ZORBAXSB-C₁₈ 色谱柱(4.6 mm × 250.0 mm, 5 μm),动相 A 为 1% 甲酸水溶液,流动相 B 为 1% 甲酸乙腈溶液。梯度洗脱:0 min 8% B;0~2 min 12% B;2~5 min 18% B;5~10 min 20% B;10~12 min 25% B;12~15 min 30% B;15~18 min 45% B;18~20 min 80% B;20~22 min 8% B;22~30 min 8% B;流速 0.8 mL/min,柱温 35 °C,检测波长 530 nm,进样体积 20 μL^[14]。

1.3.5 色泽测定 采用 CM-700d1 型分光测色仪测定紫玉米样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。基于 L^* 、 a^* 、 b^* 值计算总色差。

$$\Delta E = [(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中:

L_0 、 a_0 、 b_0 ——未处理紫玉米亮度值、红绿值、黄蓝值;

L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE ——辅色后紫玉米的亮度值、红绿值、黄蓝值、总色差。

1.3.6 质地测定 采用 CT3 25K 型质构仪测定,测试条件:探头型号为 TA25/1000 圆柱型探头,测试类型为压缩,测试速度 0.50 mm/s,测后返回速度 0.50 mm/s,测试距离 7 mm,每个相同样品测定 3 次,取平均值作为结果,

根据质地剖面的力度—时间曲线,获取硬度、弹性、胶着性、咀嚼性、内聚性等信息^[15]。

1.3.7 滋味测定 准确称取 50.000 g 紫玉米粉末置于料理机中,加入 200 mL 蒸馏水,搅拌均匀后持续 30 s,随后,以 3 000 r/min 离心 5 min,收集上清液进行测定。根据文献[16],修改如下:选用 AAE、GL1、CTO、CAO、AE1、COO 味觉传感器及对应 2 个参比传感器,每个相同样品测定 3 次,取平均值作为结果。

1.3.8 抗氧化活性测定

(1) DPPH 自由基清除率测定:参照文献[17],按式(4)计算 DPPH 自由基清除率。

$$I = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

I ——DPPH 自由基清除率,%;

A_i ——添加样品的吸光值;

A_j ——添加无水乙醇和样品的吸光值;

A_c ——添加无水乙醇的吸光值。

(2) ABTS 自由基清除率测定:参照文献[17],按式(5)计算 ABTS 自由基清除率。

$$I = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

I ——ABTS 自由基清除率,%;

A_0 ——不加清除剂的吸光值;

A_1 ——加入清除剂后的吸光值。

(3) 铁离子还原能力:参照文献[17]。

1.3.9 综合评分 感官评价小组为 20 名具有感官评价经验的老师和学生构成,评价指标为色泽、滋味、外观、质地。参照文献[18],设计紫玉米花色苷综合评分表,如表 2 所示,由 1.3.3 可知紫玉米总花色苷含量,综合评分由花色苷评分和感官评分共同组成。

1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 26.0 和 OriginPro 8.6 软件进行数据处理和显著性分析。

表 2 紫玉米花色苷综合评分

Table 2 Comprehensive evaluation of purple corn anthocyanins

指标	特性描述	分值
花色苷评分	总花色苷含量 7.5~9.5 mg/L	20~30
	总花色苷含量 5.5~7.5 mg/L	10~20
	总花色苷含量 0~5.5 mg/L	0~10
感官评分	色泽深紫、甜度高、表面微黏、质地细润	14~20
	色泽偏紫、较甜、表面较黏、质地较糯	7~13
	色泽暗紫、微甜、表面黏着性强、质地微糯	0~6

2 结果与分析

2.1 响应面试验结果

2.1.1 响应面试验设计与显著性分析 响应面试验设计与结果见表 3。

利用 Design Expert 13 软件对模型进行方差分析,如表 4 所示,3 个因素对紫玉米花色苷综合评分的影响大小为:果糖>单宁酸>果胶。其中,果糖对紫玉米的综合评

分具有极显著的影响($P<0.000\ 1$),单宁酸对紫玉米综合评分具有显著的影响($P<0.05$),果胶对紫玉米的综合评分无显著的影响($P>0.05$),果糖与果胶交互作用对紫玉米综合评分的影响为极显著($P<0.01$),单宁酸和果胶交互作用对紫玉米综合评分的影响显著($P<0.05$),果糖与单宁酸交互作用对紫玉米综合评分的影响不显著($P>0.05$)。该回归模型极显著($P<0.01$),失拟项不显著

表 3 响应面试验设计与结果

Table 3 Design and results of response surface experiment

试验组	A	B	C	总花色苷含量/(mg·L ⁻¹)	口感评分	综合评分
1	-1	1	0	5.57±0.19	9	24
2	0	0	0	5.90±0.39	15	32
3	-1	-1	0	5.45±0.70	8	17
4	0	-1	-1	5.12±0.19	14	21
5	0	1	-1	5.68±0.33	13	29
6	0	0	0	5.79±0.39	16	33
7	-1	0	-1	5.34±0.33	7	15
8	1	0	-1	8.91±0.70	10	35
9	0	0	0	6.01±0.33	17	35
10	-1	0	1	7.79±0.77	3	24
11	1	1	0	8.13±0.39	11	35
12	1	0	1	9.02±0.33	4	30
13	1	-1	0	6.57±0.51	12	31
14	0	1	1	7.90±0.51	6	28
15	0	-1	1	8.02±0.88	5	28
16	0	0	0	6.23±0.19	18	36
17	0	0	0	6.12±0.51	19	37

(0.933 7>0.05),决定系数 $R^2=0.973\ 2$,说明二次回归方程拟合良好,试验精确度高,未知因素对试验结果的干扰较小,模型能够较好地反映试验的真实值。调整系数(R^2_{Adj})为 0.938 7,变异系数(CV)为 5.71%,即模型在取值范围内符合响应值 93.87%,试验操作可靠性高,该模型可以用于分析和预测不同浸渍涂膜处理对紫玉米综合评分的影响。

另外,A、B、AC、A²、B²、C²对紫玉米综合评分影响均极显著($P<0.01$),BC 对紫玉米综合评分影响显著($P>0.05$),通过对比 F 值可见对紫玉米综合评分的影响程度强弱顺序为果糖>单宁酸>果胶,即不同浸渍涂膜处理时,果糖对紫玉米综合评分的影响程度要大于单宁酸和果胶。

2.1.2 响应面分析与优化 如图 1 所示,果糖和单宁酸的 3D 响应曲面图坡度平缓,等高线图接近圆形,表明二者的交互作用不显著;果糖和果胶、单宁酸和果胶的等高线图接近椭圆,3D 响应曲面图陡峭,表明二者的交互作

表 4 回归方程方差分析表[†]

Table 4 Analysis table of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	687.52	9	76.39	28.22	0.000 1	* *
A	325.13	1	325.13	120.10	<0.000 1	* *
B	45.13	1	45.13	16.67	0.004 7	* *
C	12.50	1	12.50	4.62	0.068 7	
AB	2.25	1	2.25	0.83	0.392 3	
AC	49.00	1	49.00	18.10	0.003 8	* *
BC	16.00	1	16.00	5.91	0.045 3	*
A ²	73.39	1	73.39	27.11	0.001 2	* *
B ²	56.87	1	56.87	21.01	0.002 5	* *
C ²	82.44	1	82.44	30.45	0.000 9	* *
残差	18.95	7	2.71			
失拟项	1.75	3	0.58	0.14	0.933 7	不显著
纯误差	17.20	4	4.30			
总和	706.47	16				

[†] * * 表示 $P<0.01$ 差异极显著; * 表示 $P<0.05$ 差异显著; $R^2=0.973\ 2$; $R^2_{\text{Adj}}=0.938\ 7$ 。

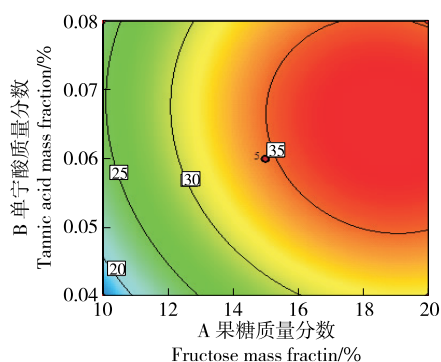
用显著。

2.1.3 最佳辅色配方的确定 通过响应面软件优化预测出最佳工艺条件为:果糖质量分数 19.230%,单宁酸质量分数 0.066%,果胶质量分数 1.868%,紫玉米总花色苷的综合评分为 37.499 分。考虑实际操作修订为果糖质量分数 19%,单宁酸质量分数 0.07%和果胶质量分数 1.9%,在此条件下进行验证实验,试验所得结果的实际值与预测值的综合评分分别为 37.499 和 37.333,相对误差为 0.443%,表明该模型有较好的预测作用,合理可行。

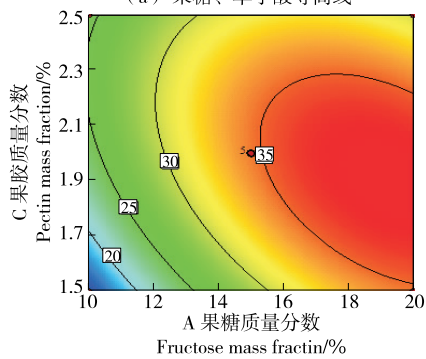
2.2 最佳辅色配方与未处理紫玉米的品质差异

2.2.1 花色苷组分和色泽 如表 5 所示,经最佳辅色配方处理后,紫玉米花色苷组分及总花色苷含量均大于未处理的;矢车菊-3-O-葡萄糖苷、天竺葵-3-O-葡萄糖苷和芍药-3-O-葡萄糖苷含量分别增加了 77.64%,64.82%,

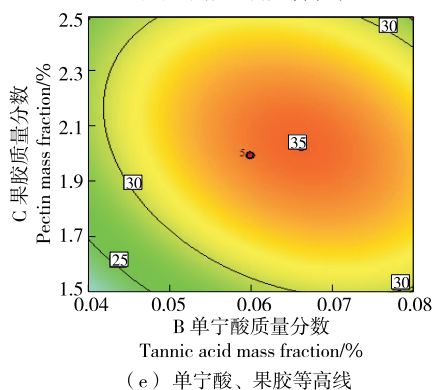
54.75%,总花色苷含量增加了 67.98%。说明辅色处理显著提高了紫玉米花色苷的稳定性。Daravingas 等^[19]在对黑莓的研究中发现,10%果糖对花色苷具有明显的辅色作用。潘颖等^[20]在对紫甘蓝的研究中发现,单宁酸质量浓度增加到 0.1 mg/mL 时花色苷吸光值增加了 59.70%。Buchweitz 等^[9]研究发现,添加果胶对不同来源的花色苷稳定性有不同的效果,其中对草莓花色苷的辅色效果最好。果糖作为辅色剂降低了水分活度,使花色苷的降解反应速率下降,生成假碱式结构的速度减慢,花色苷得到了保护,单宁酸中的羟基与花色苷中的黄阳盐离子(AH^+)发生分子间非共价键辅色作用,提高了花色苷的稳定性,花色苷黄阳盐离子(AH^+)和果胶游离羧基之间的离子相互作用以及花色苷的芳环堆积作用提高了花色苷的稳定性^[21]。



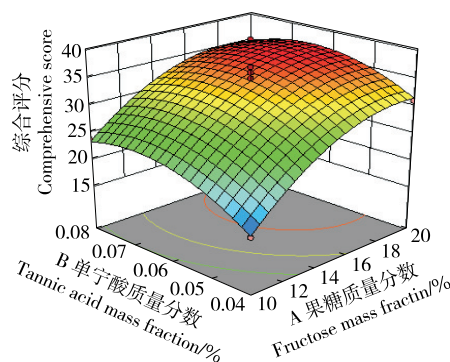
(a) 果糖、单宁酸等高线



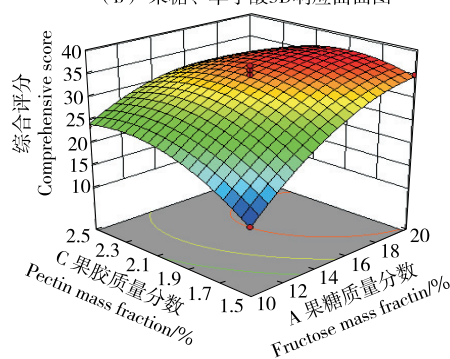
(c) 果糖、果胶等高线



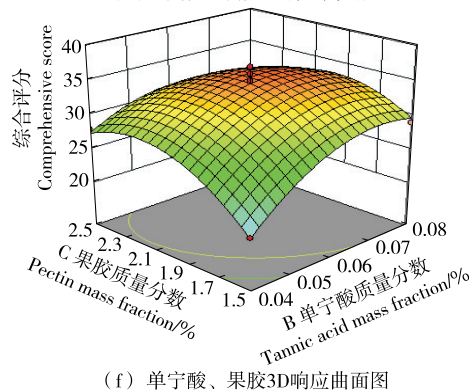
(e) 单宁酸、果胶等高线



(b) 果糖、单宁酸3D响应曲面图



(d) 果糖、果胶3D响应曲面图



(f) 单宁酸、果胶3D响应曲面图

图 1 各因素交互作用对紫玉米综合评分的影响

Figure 1 Influence of interaction of various factors on comprehensive score of purple corn

如表 6 所示,与未处理紫玉米相比,经最佳辅色配方处理后,紫玉米色泽 L^* 值、 b^* 值和 ΔE 值分别下降了 26.47%,54.23%,66.30%, a^* 值增加了 78.38%,紫玉米花色苷含量与 a^* 值呈正相关,花色苷含量越高, a^* 值越大,紫玉米色泽越好,说明经辅色处理后紫玉米色泽明显改善。紫玉米经过浸渍涂膜处理,紫玉米表面的保护作用逐渐增加,阻止酶与底物的接触,氧化反应程度下降,

表 5 不同处理之间花色苷组分含量的差异

Table 5 Differences of anthocyanin content in different processing mg/kg

处理 方式	矢车菊-3-O- 葡萄糖苷	天竺葵-3-O- 葡萄糖苷	芍药-3-O- 葡萄糖苷	总花色苷
未处理	43.18±0.92	27.12±0.76	55.45±1.15	125.74±1.49
最佳组合	193.10±0.88	77.09±1.85	122.53±1.73	392.72±3.01

表 7 不同处理之间质地的差异

Table 7 Differences of texture in different processing

处理方式	硬度/N	弹性/mm	胶着性/N	咀嚼性/mJ	内聚性
未处理	584.80±185.07	1.26±0.13	296.20±73.14	3.74±1.30	0.45±0.13
最佳组合	902.40±149.95	1.21±0.18	319.20±90.14	3.90±1.33	0.30±0.10

以未处理的紫玉米为对照,并将其各滋味指标相对强度值定义为 0。由图 2 可知,最佳组合和未处理紫玉米的苦味、涩味、涩的回味的各个点基本汇于一处,说明两者在这几个滋味品质上差异不大,而酸味、甜味、咸味、鲜味、鲜的回味及鲜的回味的各点分布较近,说明两者在这几个滋味品质上存在差异。这可能是浸渍液中的果糖增加了紫玉米的甜味,单宁酸增加了酸味,果胶在紫玉米的表面形成了保护层,3 种辅色剂的添加对紫玉米的滋味产生一定的影响。

2.2.3 抗氧化活性 由图 3(a)可知,在质量浓度 0.02~0.06 mg/mL 范围内,未处理的紫玉米花色苷对 DPPH 自由基的清除率为 31%~70%,经最佳辅色配方处理的对

紫玉米色泽得以保护^[22]。

2.2.2 质地和滋味 如表 7 所示,与未处理的紫玉米相比,经最佳辅色配方处理后紫玉米的硬度、胶着性、咀嚼性分别增加了 35.19%,7.21%,4.10%,弹性、内聚性降低了 3.97%,33.33%,紫玉米质地得到显著改善($P<0.05$)。这可能是因为果糖、单宁酸浸渍处理改变了紫玉米细胞壁孔室结构和强度变化,使其组织结构发生变化,果胶在紫玉米表皮形成保护膜,使紫玉米表皮硬度增加,咀嚼性增加,弹性、内聚性降低,胶着性增加。

表 6 不同处理之间色泽的差异

Table 6 Differences of color in different processing

处理方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
未处理	35.96±0.07	1.36±0.08	9.22±0.09	16.38±0.09
最佳组合	26.44±0.14	6.29±0.05	4.22±0.15	5.52±0.14

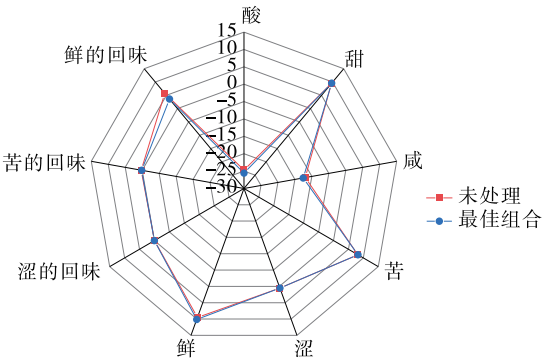


图 2 电子舌滋味强度雷达图谱

Figure 2 The radar chart by electronic tongue

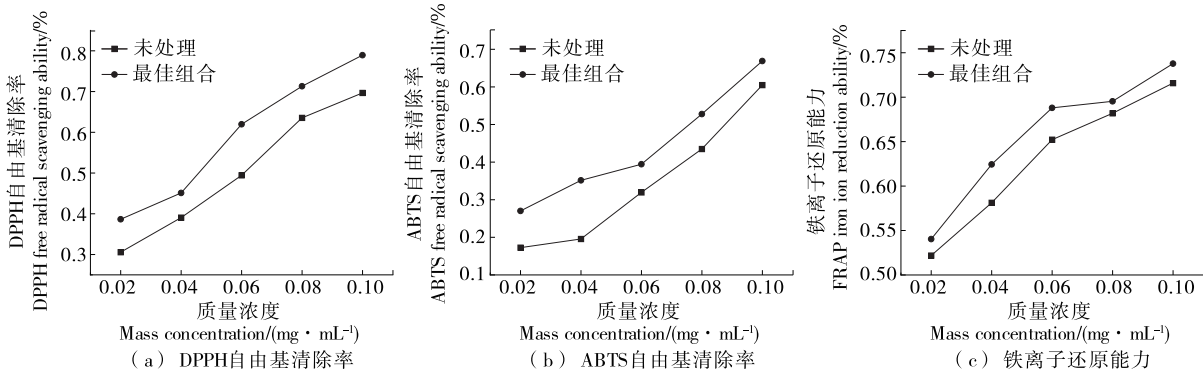


图 3 辅色处理对紫玉米花色苷抗氧化活性的影响

Figure 3 Effects of copigmentation on antioxidant activity of purple corn anthocyanins

DPPH 自由基的清除率为 39%~79%，二者均显示出较强的 DPPH 自由基清除能力。未处理和经辅色处理的紫玉米花色苷对 DPPH 自由基清除能力均随其质量浓度的增加而增加，最佳组合的 DPPH 自由基清除能力显著大于未处理的紫玉米花色苷 ($P < 0.05$)。

由图 3(b)可知，在质量浓度 0.02~0.06 mg/mL 范围内，未处理的紫玉米花色苷对 ABTS 自由基的清除率为 17%~61%，经最佳辅色配方处理的对 ABTS 自由基的清除率为 27%~67%。质量浓度 < 0.06 mg/mL 时，ABTS 自由基清除率增长迅速，质量浓度 > 0.06 mg/mL 时，增长速率减慢，但两者均表现出较强的清除能力。

由图 3(c)可知，在质量浓度 0.02~0.06 mg/mL 范围内，未处理的紫玉米花色苷对铁离子还原能力为 52%~72%，经最佳辅色配方处理的对铁离子还原能力为 54%~74%，二者对铁离子还原能力随其质量浓度的增加而增加。当质量浓度为 0.06 mg/mL 时，最佳组合的铁离子还原能力与未处理紫玉米花色苷的差异最大。

综上所述，紫玉米经过果糖、单宁酸和果胶辅色处理后，提高了紫玉米花色苷的抗氧化活性。

3 结论

研究以果糖、单宁酸和果胶作为辅色剂，分析了不同组合方式对紫玉米花色苷辅色效果的影响。通过响应面分析法，优化得出果糖质量分数 19%、单宁酸质量分数 0.07%、果胶质量分数 1.9% 的组合对紫玉米花色苷的辅色效果最佳。与未处理的紫玉米相比，最佳组合配方优化后紫玉米花色苷组分、色泽、质地、滋味和抗氧化活性均能有效提升。

参考文献

- [1] 郝小琴, 梁树辉, 赵文涛, 等. 紫黑甜糯玉米花青素含量研究[J]. 现代农业科技, 2019, 33(15): 21-26.
- HAO X Q, LIANG S H, ZHAO W T, et al. Study on anthocyanin content of purple-black and sweet-waxy corn [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, 33(15): 21-26.
- [2] AOKI H, KUZE N, KATO Y, et al. Anthocyanin isolated from purple corn (*Zea mays* L.) [J]. Foods and Food Ingredients Journal of Japan, 2001, 32(3): 23-36.
- [3] PHILLIPS G F, GARDINER J. The chromatographic identification of psychotropic drugs[J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2011, 21(12): 793-807.
- [4] URSU M G S, MILEA S A, PACULARU-BURADA B, et al. Optimizing of the extraction conditions for anthocyanin's from purple corn flour (*Zea mays* L.): Evidences on selected properties of optimized extract[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100521.
- [5] DAO L T, TAKEOKA G R, EDWARDS R H, et al. Improved method for the stabilization of anthocyanidins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(9): 3 564-3 569.
- [6] ESCRIBANO B, MAITE T. Anthocyanin copigmentation-evaluation, mechanisms and implications for the colour of red wines [J]. Current Organic Chemistry, 2012, 16(6): 715-723.
- [7] 卢钰, 董现义, 杜景平, 等. 花色苷研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2004(2): 315-320.
- LU Y, DONG X Y, DU J P, et al. The research progress of anthocyanins [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2004(2): 315-320.
- [8] FERNANDES A, BRAS N F, OLIVEIRA J, et al. Impact of a pectic polysaccharide on oenin copigmentation mechanism [J]. Food Chemistry, 2016, 209(15): 17-26.
- [9] BUCHWEITZ M, SPETH M, KAMMERER D R, et al. Impact of pectin type on the storage stability of black currant (*Ribes nigrum* L.) anthocyanins in pectic model solutions [J]. Food Chemistry, 2013, 139(4): 1 168-1 178.
- [10] 管敬喜, 文仁德, 成果, 等. 野生毛葡萄皮渣花色苷稳定性研究[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 210-214.
- GUAN J X, WEN R D, CHENG G, et al. Study on the stability of anthocyanin in wild grape skin pomace [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 210-214.
- [11] 楼乐燕, 岳阳, 尹培, 等. 单宁酸和绿原酸对杨梅花色苷的辅色作用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 74-80.
- LOU L Y, YUE Y, YIN P, et al. The copigmentation effect of tannic acid and chlorogenic acid on anthocyanin of bayberry[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(4): 74-80.
- [12] 麦日艳古·亚生, 蒋耀英, 刘小莉, 等. 不同胶体对黑莓果汁花色苷稳定性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 11-17.
- MAIRIYANGU Y S, JIANG Y Y, LIU X L, et al. Effects of different colloids on the stability of anthocyanins in blackberry juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 11-17.
- [13] 李华, 康文怀, 陶永胜, 等. 微氧处理对赤霞珠葡萄酒多酚及其品质的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 401-404.
- LI H, KANG W H, TAO Y S, et al. Effect of micro-oxygen treatment on polyphenols and quality of cabernet sauvignon wine [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2006, 27(5): 401-404.
- [14] 孟俊文, 田翔. HPLC 测定紫玉米中花青素的含量[J]. 现代农业科技, 2020(17): 210-211.
- MENG J W, TIAN X. Determination of anthocyanin content in purple corn by HPLC [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(17): 210-211.
- [15] 胡丽丽, 牛丽影, 李大婧, 等. 质构仪探头选择及样品处理对草莓脯 TPA 测定结果的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(5): 170-176.
- HU L L, NIU L Y, LI D J, et al. Effect of texture instrument selection and sample treatment on TPA measurements of strawberry preserves[J]. Food Research and Development, 2022, 43(5): 170-176.

(下转第 216 页)

- [J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(4): 1-10.
- [12] 夏亚男, 赵赞, 王浩然, 等. SPME-GC/MS 结合 OAV 值分析马奶酒的关键香气成分[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 318-325.
- XIA Y N, ZHAO Y, WANG H R, et al. Analysis on the key volatile flavor compounds of fermented koumiss by SPME-GC/MS combined with OAV[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(4): 318-325.
- [13] 李官丽, 伍淑婕, 罗秀娟, 等. 基于 SPME-GC-MS 萃取荸荠挥发性风味物质研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(14): 70-78.
- LI G L, WU S J, LUO X J, et al. Extraction of volatile flavor compounds from Chinese water chestnut based on SPME-GC-MS[J]. Food Research and Development, 2022, 43(14): 70-78.
- [14] 吴林, 张强, 臧慧明, 等. 气味活度值法评价蓝莓果皮、果肉、果汁挥发性香气成分[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 195-200.
- WU L, ZHANG Q, ZANG H M, et al. Evaluation of volatile aroma components in blueberry peel, pulp and Juice by odor activity value[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 195-200.
- [15] 王晓艳, 韩延超, 吴伟杰, 等. 不同干燥方式对菠萝品质和挥发性风味的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(5): 1 168-1 177.
- WANG X Y, HAN Y C, WU W J, et al. Effects of different drying methods on quality and volatile flavor of pineapple[J]. Zhejiang Agricultural Journal, 2023, 35(5): 1 168-1 177.
- [16] 康翠翠, 施文正, 方林, 等. 不同冻结方式对草鱼肉挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 229-235.
- KANG C C, SHI W Z, FANG L, et al. Effects of different freezing methods on the volatile components of grass carp meat[J]. Food Science, 2018, 39(14): 229-235.
- [17] 李俊, 祝愿, 方舒婷, 等. 基于固相微萃取气质联用对贵州红茶香气成分特征的研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 304-316.
- LI J, ZHU Y, FANG S T, et al. Study on aroma composition characteristics of Guizhou black tea by solid phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 304-316.
- [18] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 219-228.
- WANG M Q, ZHU Y, ZHANG Y, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of green teas with fresh scent flavor[J]. Food Science, 2019, 40(22): 219-228.
- [19] 杨祺福, 徐文思, 胡思思, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的小龙虾加工水煮液中挥发性风味成分萃取条件优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 57-63.
- YANG Q F, XU W S, HU S S, et al. Optimization of extraction conditions of volatile flavor components from crayfish cooking solution based on HS-SPME-GC-MS[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 57-63.
- [20] 岳翠男, 秦丹丹, 李文金, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定浮梁红茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 251-258.
- YUE C N, QIN D D, LI W J, et al. Identification of key aroma components in Fuliang black tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 251-258.
- (上接第 202 页)
- [16] 许雅楠, 连建梅, 范群艳, 等. 电子舌在燕窝新品开发配料选择上的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3 375-3 382.
- XU Y N, LIAN J M, FAN Q Y, et al. The application of electronic tongue in ingredient selection for new product development of bird's nest[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(10): 3 375-3 382.
- [17] 张钟元, 朱翠平, 李大婧, 等. 不同干燥方式对牛蒡片多酚含量及抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 172-178.
- ZHANG Z Y, ZHU C P, LI D J, et al. Effects of different drying methods on polyphenol content and antioxidant capacity of burdock chips[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(1): 172-178.
- [18] 孙伟振, 赵森, 吴洪婕, 等. 不同品种类型玉米口感与营养及风味品质的比较[J]. 作物研究, 2011, 25(6): 556-558.
- SUN Y Z, ZHAO M, WU H J, et al. Comparison of taste, nutrition and flavor quality of different varieties of corn[J]. Crop Research, 2011, 25(6): 556-558.
- [19] DARAVINGAS G, CAIN R F. Thermal degradation of black raspberry anthocyanin pigments in model systems[J]. Journal of Food Science, 1968, 33(2): 138-142.
- [20] 潘颖, 高庆超, 孙晨晨, 等. 不同有机酸对紫甘蓝花色苷辅色效应及热稳定性对比分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 97-108.
- PAN Y, GAO Q C, SUN C C, et al. Comparative analysis of copigmentation effect and thermal stability of different organic acids on anthocyanin in purple cabbage[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 97-108.
- [21] 张慙, 廖红梅. 果蔬食品加工贮藏过程中易变色素的降解及调控机理研究与展望[J]. 中国食品学报, 2011, 11(9): 258-267.
- ZHANG M, LIAO H M. Research and prospect on the degradation and regulation mechanism of volatile pigments in fruit and vegetable food during processing and storage [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(9): 258-267.
- [22] 汤月昌, 许凤, 董栓泉, 等. 果糖对西兰花抗氧化性及其品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 164-169.
- TANG Y C, XU F, DONG S Q, et al. Effects of fructose on antioxidant activity and quality of broccoli [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(4): 164-169.