DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.01.038

紫薯粉发酵工艺优化及抗氧化能力分析

Optimization of fermentation process and analysis of antioxidant capacity of purple sweet potato powder

宋 莹[1] 刘思含[1] 常 霞[1] 侯宇豪[1]

SONG Ying[1] *LIU Si-han*[1] *CHANG Xia*[1] *HOU Yu-hao*[1]

谢秋涛[2] 袁洪燕[2] 李高阳[1,2]

XIE Qiu-tao[2] *YUAN Hong-yan*[2] *LI Gao-yang*[1,2]

(1. 湖南大学研究生院隆平分院,湖南 长沙 410125;

2. 湖南省农业科学院农产品加工研究所,湖南 长沙 410125)

(1. *Longping Branch*, *Graduate School of Hunan University*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*; 2. *Institute of Agricultural Products Processing*, *Hunan Academy of Agricultural Sciences*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*)

摘要:以紫薯生粉为原料,对低糖酵母发酵制备高抗氧化活性紫薯粉的工艺条件进行优化,并探讨发酵前后总黄酮、总酚、花青素与抗氧化能力的变化。结果表明,低糖酵母发酵的最佳工艺条件为酵母添加量 0.95%,料液比 10∶22 (g/mL)、发酵时间 16 h、发酵温度 23 ℃,该条件下的紫薯粉抗氧化能力为 404.94 mg V_C/100 g,总酚含量为 123.85 mg GAE/100 g,总黄酮含量为 610.64 mg 芦丁/100 g,花青素含量为 26.99 mg/100 g,其抗氧化能力显著提高,花青素的稳定性优于未发酵紫薯粉。

关键词:紫薯;总酚;总黄酮;花青素;抗氧化能力

Abstract: Based on the single factors, the response surface tests were used to optimize the process conditions of low-sugar yeast fermentation of the purple sweet potato to prepare high antioxidant activity powder, and the changes of total flavonoids, total phenols, anthocyanins and antioxidant capacity before and after fermentation were investigated. The optimum fermented conditions were determined as follows: 0.95% yeast addition, 10∶22 (g/mL) ratio of feed to liquid, fermentation at 23 ℃ for 16 h. The antioxidant capacity was 404.94 mg VCEAC/100 g, with a total phenol content of 123.85 mg GAE/100 g, a total flavonoid content of 610.64 mg rutin/100 g, and a anthocyanin content of 26.99 mg/100 g. The fermented purple sweet potato powder had certain antioxidant capacity, and the stability of anthocyanins was better than that of its unfermented powder.

Keywords: purple sweet potato; total phenolic; total flavonoid; anthocyanin; antioxidant capacity

紫薯为旋花科一年生草本植物,于 20 世纪 90 年代从日本引进[1]。主产区为广东、广西、湖南、四川、江西[2],产量一般高于 27 t/hm²[3]。紫薯的营养价值高于普通甘薯,富含花青素[4-5]。高水分、皮薄、肉脆的特点使紫薯易受机械损伤、病虫害侵染而腐烂,不耐运输和贮藏。近年来,研究[6]多集中于紫薯产品的原料添加与功能物质提取。紫薯粉常被添加到面条、馒头、面包、饼干等产品中,从而提高产品的营养价值和风味[7]。但因其富含不溶性膳食纤维,产品的口感、蒸煮特性不理想[8]。

发酵作为一种常见的食品加工方式,一直被用来提高食品的营养、风味与口感[9]。发酵可将食物中的大分子物质水解,释放一些结合态的功能成分[10-11]。郭孝萱等[12]比较了 3 种真菌对紫薯发酵后总酚、总黄酮、花色苷、抗氧化活性及抗癌性能的变化,发现发酵紫薯总酚含量与抗氧化能力均显著上升,且抗癌效果较好。Anthony 等[13]对玉米和大豆混合粉进行发酵,其产品的蛋白质含量提升。Poonam 等[14]研究发现黑米—鹰嘴豆混合粉发酵后的总酚含量和总抗氧化能力均上升,且提高了发酵粉膨化产品品质。紫薯发酵品的研究主要集中于紫薯酒[15]、紫薯醋[16]、紫薯酸奶[17]等,未见有关酵母紫薯发酵粉的研究报道。试验拟以紫薯为原料,采用低糖酵母发酵,探讨发酵条件对紫薯粉抗氧化能力的影响,研制出具有一定功效的发酵紫薯粉,为紫薯的高值转化提供新途径。

基金项目:湖南省科技创新平台(编号:2018TP1030);湖南省现代农业产业技术体系(编号:湘财农指[2019]47 号)

作者简介:宋莹,女,湖南大学在读硕士研究生。

通信作者:李高阳(1971—),男,湖南省农业科学院研究员,博士生导师,博士。E-mail:lgy7102@163.com

收稿日期:2019-10-31

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

紫薯:紫罗兰,湖南市售;

低糖酵母:安琪酵母,安琪酵母股份有限公司;

芦丁、没食子酸标准品:成都曼斯特生物科技有限公司;

福林酚:上海源叶生物科技有限公司;

2-2-联氮-二(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸):试剂级,上海瑞永生物科技有限公司;

抗坏血酸:分析纯,西陇科学股份有限公司;

过硫酸钾、碳酸钠、乙酸钠:分析纯,天津市恒兴化学试剂制造有限公司;

乙醇、盐酸、冰乙酸、亚硝酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

硝酸铝:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

氢氧化钠:分析纯,湖南汇虹试剂有限公司;

所有用水为超纯水。

1.2　仪器与设备

紫外—可见分光光度计:UV-1800 型,岛津仪器(苏州)有限公司;

高速离心机:Avanti J-26xp 型,美国 Beckman 公司;

恒温恒湿箱:LHS-250HC-11 型,上海一恒科学仪器有限公司;

数控超声波清洗器:KQ-700DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

精密分析天平:BSA 124S 型,广州市授科仪器科技有限公司;

pH 计:pHS-3C 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9053A 型,上海精宏实验设备有限公司;

电热恒温水浴锅:HH.S21-Ni6 型,北京三二八科学仪器有限公司;

多功能粉碎机:RS-FS1401 型,合肥荣事达小家电有限公司。

1.3　方法

1.3.1　紫薯发酵粉制备工艺流程[18]

鲜紫薯→去皮、切片→粉碎→酵母发酵→紫薯发酵粉

1.3.2　抗氧化能力测定

参照 Zeng 等[19]的方法,测定 ABTS 自由基清除率,结果表示为 mg V_C/100 g·样品。

1.3.3　单因素试验设计

(1) 酵母添加量:料液比 10∶8 (g/mL),发酵时间 16 h,发酵温度 25 ℃,酵母添加量分别为 0.5%,1.0%,1.5%,2.0%,2.5%,考察酵母添加量对紫薯粉抗氧化能力的影响。

(2) 料液比:酵母添加量 1.0%,发酵时间 16 h,发酵温度 25 ℃,料液比分别为 10∶3,10∶8,10∶13,10∶18,10∶23 (g/mL),考察料液比对紫薯粉抗氧化能力的影响。

(3) 发酵时间:酵母添加量 1.0%,料液比 10∶18 (g/mL),发酵温度 25 ℃,发酵时间分别为 8,16,24,32,40 h,考察发酵时间对紫薯粉抗氧化能力的影响。

(4) 发酵温度:酵母添加量 1.0%,料液比 10∶18 (g/mL),发酵时间 16 h,发酵温度分别为 21,25,29,33,37 ℃,考察发酵温度对紫薯粉抗氧化能力的影响。

1.3.4　响应面试验设计

在单因素试验的基础上,以酵母添加量、料液比、发酵时间、发酵温度为影响因素,以抗氧化能力为试验指标,设计四因素三水平响应面试验优化紫薯粉的发酵工艺。

1.3.5　总酚、总黄酮、花青素含量的测定

(1) 总酚:参照郭孝萱等[12]的方法略做改动。取发酵紫薯粉溶于 80% 乙醇,取 0.5 mL 待测样品溶液于 10.0 mL 容量瓶中,加 0.5 mL 去离子水,摇匀。加入 0.5 mL 福林试剂,充分摇匀,1 min 后加 20% Na_2CO_3 溶液 1.5 mL,混匀,用去离子水定容至 10.0 mL,70 ℃水浴 10 min,冷却后于 760 nm 下测定吸光值。以没食子酸为标准品,绘制 GAE 标准曲线[20],线性回归方程为 $y=13.37x-0.003$($R^2=0.996$),结果表示为 mg GAE(没食子酸)/100 g。

(2) 总黄酮:参照郭孝萱等[12]的方法略做改动,取发酵紫薯粉溶于 80% 乙醇,取 1.0 mL 待测样品溶液于 10.0 mL 容量瓶中,加入 70% 乙醇至 5 mL,加入 5% $NaNO_2$ 溶液 0.3 mL,摇匀静置 5 min;再加入 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 0.3 mL,摇匀静置 6 min;加入 1 mol/L NaOH 溶液 2 mL;混匀后,用 70% 乙醇定容至 10 mL,静置 30 min 后,于 510 nm 下测定吸光值。以芦丁为标准品,绘制芦丁标准曲线[21],线性回归方程为 $y=0.711x+0.015$($R^2=0.996$),结果表示为 mg 芦丁/100 g。

(3) 花青素含量:参照张毅等[22-25]的方法稍作改动。分别取发酵紫薯粉和未发酵紫薯粉 1 g,放入密封容器中,按料液比 1∶25 (g/mL)加入 70%的乙醇溶液(pH 为 6),50 ℃下超声萃取 30 min,4 000 r/min 离心 20 min,取上清液备用。采用 pH 示差法,测定溶液在 510,700 nm 下的吸光值。按式(1)、(2)计算花青素含量。

$$A=(A_{510}-A_{700})_{pH\ 1.0}-(A_{510}-A_{700})_{pH\ 4.5}, \quad (1)$$

$$C=\frac{A\times M\times DF\times V\times 100}{m\times \varepsilon\times L}, \quad (2)$$

式中:

A——吸光值;

C——花青素含量,mg/100 g;

M——矢车菊素-3-葡萄糖苷的分子量,449.2;

DF——稀释倍数;

V——样液体积,mL;

m——样品质量,g;

ε——矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数,29 600;

L——光程,1 cm。

1.3.6　发酵紫薯粉和未发酵紫薯粉花青素热稳定性的测

定　参照文献[22]的方法略作修改，取 20 mL 样液置于试管中，分别于 50，70，90 ℃水浴锅中，每隔 1 h 取出冷却，测定花青素含量。

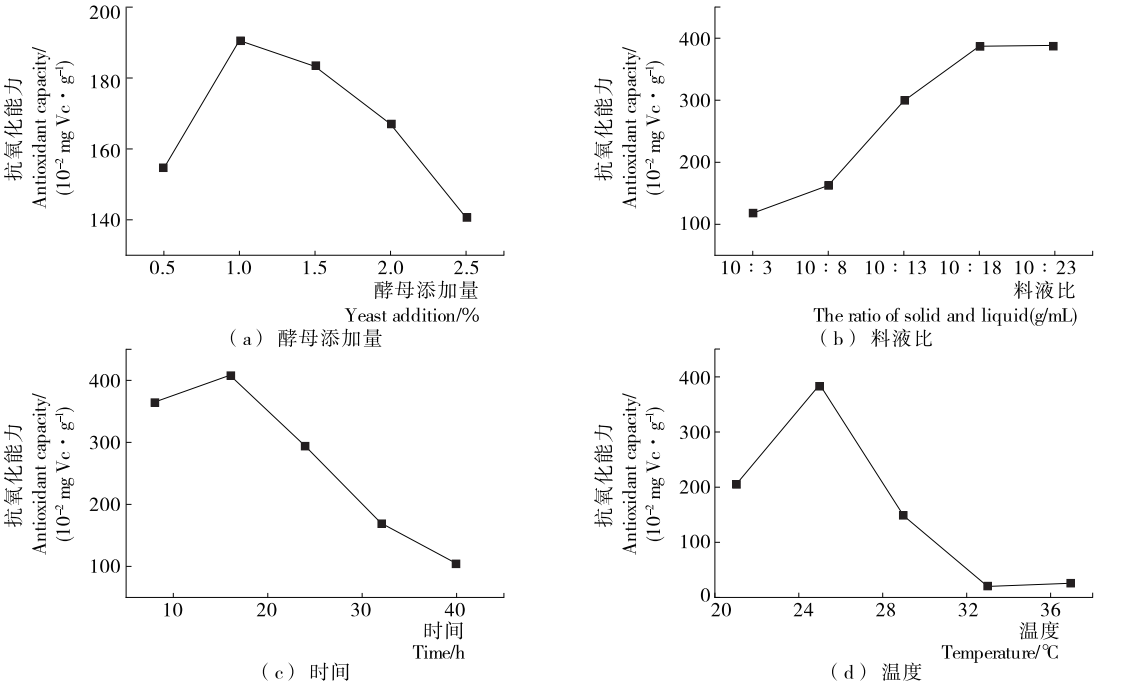
1.3.7　发酵紫薯粉与未发酵紫薯粉花青素对 pH 稳定性的测定　参照文献[22]的方法略作修改，取 7 mL 样液，分成 7 份，分别加入 pH 为 4，5，6，7，8，9，10 的去离子水中，摇匀，放置 1 h 后测定其花青素含量。

1.3.8　数据处理　采用 Origin 95 进行作图，采用 Design-Expert 8.0.6 进行响应面分析。

2　结果与分析

2.1　单因素试验

由图 1 可知，紫薯发酵粉的抗氧化能力随酵母添加量的增加先升高后降低，当接种量为 1%时，抗氧化能力最佳，超过 1%后，抗氧化能力逐渐下降，可能是由于接种量过大造成的[26]。紫薯发酵粉的抗氧化能力随料液比的上升持续上升并趋于平缓，说明在一定范围内，料液比的增加有利于抗氧化物质的大量溶出。紫薯发酵粉的抗氧化能力随发酵时间的增加先上升后快速下降，当发酵时间为 16 h 时，抗氧化能力出现峰值。Wang 等[27-28]研究发现发酵后多酚与黄酮的含量在发酵前期增加明显，发酵成熟期后下降，可能是发酵后期微生物开始分解酚类化合物来维持生命活动，导致抗氧化能力下降。紫薯发酵粉的抗氧化能力随发酵温度的升高逐渐降低，当发酵温度为 25 ℃时，抗氧化能力最强。



（a）酵母添加量　（b）料液比　（c）时间　（d）温度

图 1　发酵条件对发酵紫薯粉抗氧化能力的影响

Figure 1　Effects of different fermentation conditions on antioxidant capacity of fermented purple potato powder

2.2　响应面法优化设计

2.2.1　试验设计与结果分析　根据单因素试验的结果，采用四因素三水平的响应曲面分析方法进行发酵条件的优化，试验因素水平表见表 1，试验设计与结果见表 2。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对响应面试验结果进行分析，得到以紫薯粉抗氧化能力为响应值的二次项回归方程：

$$Y=396.89-12.86A+6.17B-26.18C-34.65D+8.78AB-31.27AC+3.47AD+18.15BC-27.73BD-26.31CD-40.41A^2-10.82B^2-90.71C^2-67.33D^2。(3)$$

为检验回归方程中各因素对紫薯粉抗氧化能力的影响程度以及有效性，对式(3)中的回归方程进行方差分析，结果见表 3。由表 3 可知，回归模型 P<0.000 1，达到极显著水平，失拟项 P=0.118 3>0.05，不显著，说明该回归方程适合并有效；$R^2=0.909\ 5$，$R^2_{Adj}=0.818\ 9$，说明该回归方程拟合度和可信度高，故可用此模型对紫薯粉的发酵工艺结果进行分析和预测。各因素对发酵紫薯粉的抗氧化能力影响顺序为：发酵时间>发酵温度>酵母添

表 1　因素和水平表

Table 1　Factors and the levels of table

水平	A 酵母添加量/%	B 料液比(g/mL)	C 发酵时间/h	D 发酵温度/℃
1	0.5	13∶10	8	21
0	1.0	18∶10	16	25
−1	1.5	23∶10	24	29

加量>料液比。其中,二次项 A^2、C^2、D^2 对抗氧化能力影响极显著,交互项 AC 对抗氧化能力影响显著。

2.2.2　试验因素间的交互作用　由图 2 可知,发酵时间与酵母添加量对紫薯粉抗氧化能力的交互作用显著,在酵母添加量一定时,抗氧化能力随着发酵时间增加先增加而后减小,与 2.2.1 分析结果一致。

2.2.3　最佳工艺参数　进一步分析回归方程,得到紫薯粉的最优工艺参数为:酵母添加量 0.95%,料液比 10∶22.06 (g/mL),发酵时间 16.12 h,温度23.28 ℃,此时的抗氧化能力理论值为 407.237 mg V_C/100 g。结合实际,

表 2　响应面优化试验设计及结果

Table 2　Response surface optimization test design and results

试验号	A	B	C	D	抗氧化能力/(10^{-2} mg $V_C \cdot g^{-1}$)	试验号	A	B	C	D	抗氧化能力/(10^{-2} mg $V_C \cdot g^{-1}$)
1	1	0	0	−1	325.06	16	0	−1	−1	0	319.93
2	0	0	0	0	397.03	17	0	1	−1	0	314.89
3	1	0	1	0	186.09	18	0	1	0	1	261.11
4	1	0	−1	0	306.70	19	1	0	0	1	268.05
5	0	0	0	0	376.91	20	0	−1	1	0	218.20
6	0	1	1	0	285.78	21	1	−1	0	0	300.27
7	0	0	−1	1	243.38	22	0	0	1	1	157.17
8	0	0	1	−1	301.16	23	−1	0	1	0	294.48
9	−1	−1	0	0	385.27	24	1	1	0	0	337.84
10	0	0	−1	−1	282.13	25	0	−1	0	1	330.87
11	0	1	0	−1	369.18	26	0	0	0	0	384.85
12	0	0	0	0	406.94	27	−1	0	0	−1	295.87
13	0	−1	0	−1	328.01	28	−1	0	0	1	225.00
14	−1	0	−1	0	290.00	29	−1	1	0	0	387.73
15	0	0	0	0	418.70						

表 3　方差分析表†

Table 3　Regression equation analysis of variance table

方差来源	平方和	自由度	均方	*F* 值	P 值	显著性
模型	1.10E+005	14	7 879.65	10.05	<0.000 1	**
A	1 985.07	1	1 985.07	2.53	0.134 0	
B	456.09	1	456.09	0.58	0.458 4	
C	8 224.19	1	8 224.19	10.48	0.006 0	**
D	14 409.55	1	14 409.55	18.37	0.000 8	**
AB	308.18	1	308.18	0.39	0.540 9	
AC	3 911.88	1	3 911.88	4.99	0.042 4	*
AD	48.02	1	48.02	0.06	0.808 2	
BC	1 318.88	1	1 318.42	1.68	0.215 8	
BD	3 076.37	1	3 076.37	3.92	0.067 7	
CD	2 768.86	1	2 768.86	3.53	0.081 3	
A^2	10 589.65	1	10 588.62	13.50	0.002 5	**
B^2	758.70	1	758.70	0.97	0.342 1	
C^2	53 374.35	1	53 374.65	68.04	<0.000 1	**
D^2	29 402.17	1	29 402.17	37.48	<0.000 1	**
残差	10 981.99	14	784.43			
失拟项	9 861.13	10	986.11	3.52	0.118 3	不显著
纯误差	1 120.86	4	280.22			
总和	1.21E+005	28				

†　** 为差异极显著(P<0.01);* 为差异显著(P<0.05);R^2=0.909 5,R^2_{Adj}=0.818 9。

调整各因素为酵母添加量 0.95%，料液比 10∶22 (g/mL)，发酵时间 16 h，温度 23 ℃，此时的抗氧化能力为 404.94 mg V_C/100 g，与预测值相差 0.56%，证明该模型可靠。

2.3 发酵前后紫薯粉总酚、总黄酮、花青素含量和抗氧化能力的变化

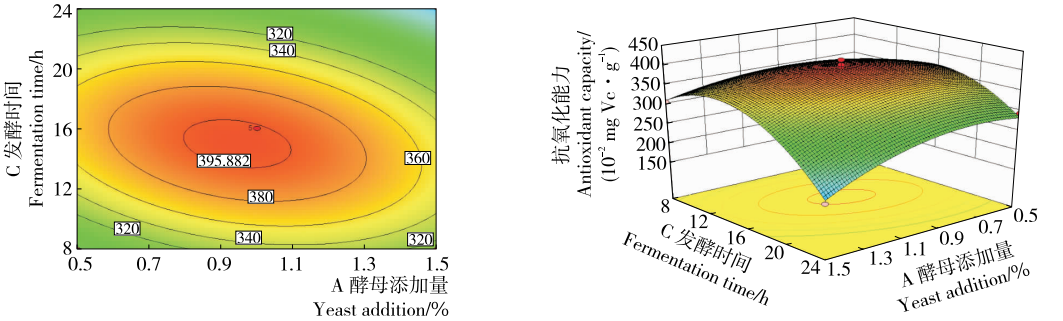
由表 4 可知，经低糖酵母发酵后的紫薯粉总酚(123.85 mg GAE/100 g)、总黄酮含量(610.64 mg 芦丁/100 g)均高于未发酵紫薯的。总酚含量的提高可能是由于微生物所产酶将酚酸从聚合物上释放所致[29]。总黄酮含量的升高可能与黄酮类物质的生物转化有关，与 Chen 等[30]的结论一致。发酵前后紫薯粉中花青素含量变化不明显，说明微生物发酵对花青素含量的影响不大。因此，发酵后紫薯粉的抗氧化能力提高，主要与样品中的多酚和黄酮类物质含量的上升有关。

2.4 发酵对花青素热稳定性的影响

由图 3 可知，发酵紫薯粉与未发酵紫薯粉的花青素含量均随温度的增加而减少；且在同一温度下，花青素含量随时间的增加不断减少，其中未发酵紫薯粉的花青素含量下降较明显，与周翠等[23,31]的研究结论相似。说明发酵紫薯粉花青素的热稳定性优于未发酵紫薯粉的。

2.5 发酵对紫薯粉 pH 稳定性的影响

由图 4 可知，不同 pH 下，发酵紫薯粉与未发酵紫薯粉的花青素稳定性差别不大，未发酵紫薯粉花青素在 pH 6 左右较为稳定，而发酵紫薯粉花青素在 pH 5 左右更为稳定。综上，酸性条件下紫薯粉的花青素更稳定，与蓝莓果渣[24]、笃斯越桔[32]的一致。



(a) 等高线　　(b) 响应面

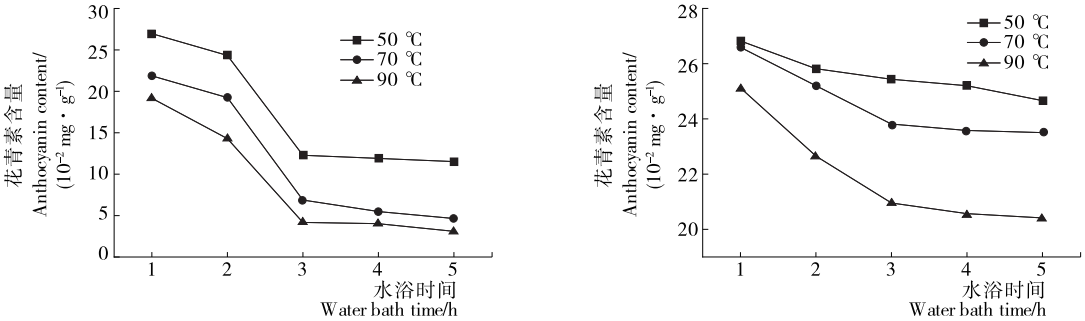
图 2　发酵条件交互作用的响应面图和等高线图

Figure 2　Response surface and contour plots of fermentation conditions interaction

表 4　未发酵和发酵紫薯粉的总酚、总黄酮、花青素含量和抗氧化能力

Table 4　Total phenol, total flavonoids, anthocyanin content and antioxidant capacity of unfermented and fermented purple sweetpotato powder

组别	TPC/ (10^{-2} mg GAE · g^{-1})	总黄酮/ (10^{-2} mg 芦丁 · g^{-1})	花青素含量/ (10^{-2} mg · g^{-1})	抗氧化能力/ (10^{-2} mg V_C · g^{-1})
未发酵	93.12±9.05	446.55±29.28	29.38±0.75	305.94±26.68
发酵	123.85±2.40	610.64±29.28	26.99±0.13	404.94±15.13



(a) 未发酵　　(b) 发酵

图 3　温度对紫薯粉花青素的影响

Figure 3　Effect of temperature on anthocyanin in fermented purple sweetpotato powder

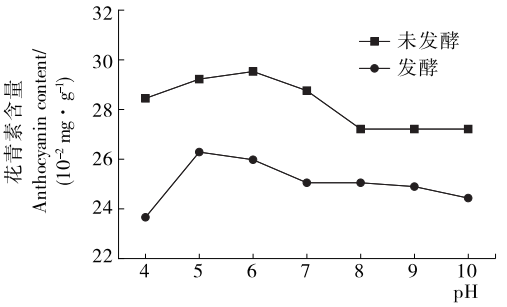


图 4　pH 对花青素含量的影响

Figure 4　Effect of pH on anthocyanin content

3　结论

试验结果表明,紫薯发酵粉制备的最佳工艺条件为低糖酵母添加量 0.95%,料液比 10∶22 (g/mL),发酵时间 16 h,发酵温度 23 ℃,此时的抗氧化能力为 404.94 mg V_C/100 g,较发酵前(305.94 mg V_C/100 g)显著提升。发酵后的多酚含量上升至 123.85 mg GAE/100 g,总黄酮含量上升至 610.64 mg 芦丁/100 g,花青素含量下降至 26.99 mg/100 g,但发酵紫薯粉的花青素热稳定性优于未发酵的。低糖酵母发酵可明显提高紫薯粉的抗氧化活性,发酵后的紫薯粉更适于热加工处理。后续可研究发酵对紫薯粉结构与组成的影响及紫薯发酵粉的品质特性。此外,试验发现低糖酵母发酵提高了紫薯发酵粉的黄酮含量,可能是低糖酵母提高了黄酮类物质的转换率,其转化机理有待进一步研究。

参考文献

[1] 王杉,邓泽元,曹树稳. 紫薯色素的研究进展[J]. 粮油食品科技,2004,12(2):45-46.

[2] 马代夫,邱军,房伯平,等. 国家甘薯区试考察与产业发展建议[J]. 杂粮作物,2004,24(5):306-308.

[3] 刘忠玲,王自力,李小艳,等. 2008～2015 年国家甘薯区域试验的回顾及思考[J]. 陕西农业科学,2018,64(3):84-88.

[4] 张明,王燕. 紫甘薯中的功能性成分研究[J]. 农产品加工,2010(5):65-67,70.

[5] KIM H W, KIM J B, CHO S M, et al.Anthocyanin changes in the Korean purple-fleshed sweet potato, Shinzami, as affected by steaming and baking[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 966-972.

[6] 陈思静. 复合紫薯脆片工艺优化及货架期预测[D]. 长沙:湖南农业大学,2016:11-12.

[7] 潘冬梅,陈超群. 生鲜紫薯面条加工工艺研究[J]. 食品科技,2015,40(1):182-186.

[8] 曾雪丹,张灿,王章英,等. *D*-最优混料设计优化复配淀粉紫薯粉条配方[J]. 食品与机械,2019,35(4):202-208,222.

[9] 揭小玲. 紫薯全粉品质特性及紫薯饼干加工技术研究[D]. 福州:福建农林大学,2013:12-13.

[10] KOSEKI T, MIHARA K, MURAYAMA T, et al. A novel Aspergillus oryzae esterase that hydrolyzes 4-hydroxybenzoic acid esters[J]. FEBS Letters, 2010, 584(18): 4 032-4 036.

[11] LIN Chia-hung, WEI Yi-tien, CHOU Cheng-chun. Enhanced antioxidative activity of soybean koji prepared with various filamentous fungi[J]. Food Microbiology, 2006, 23(7): 628-633.

[12] 郭孝萱,柳嘉,陆雪娇,等. 紫薯发酵前后总酚、总黄酮、花色苷、抗氧化性和抗癌作用比较[J]. 中国食品学报,2017,17(3):289-295.

[13] OJOKOH A O, WEI Yi-min, EROMOSELE O S. Effect of some extrusion variables on fermented maize-soybean blend[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(9): 5 763-5 771.

[14] RANI P, KUMAR A, PUROHIT S R, et al. Impact of fermentation and extrusion processing on physicochemical, sensory and bioactive properties of rice-black gram mixed flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 155-163.

[15] 王建刚. 发酵对紫薯色素的影响及紫薯酒的研制与抗氧化评价[D]. 烟台:烟台大学,2011:17-18.

[16] 贾春凤,刘松雁,陈梅香,等. 紫薯发酵醋工艺优化及其抑菌活性研究[J]. 食品与机械,2014,30(4):211-215.

[17] 亢灵涛,崔桂娟,李高阳. 紫薯复合手工酸奶工艺研究[J]. 食品工业,2018,39(5):78-82.

[18] 黄浩庭. 挤压膨化对紫薯全粉理化特性影响的研究[D]. 福州:福建农林大学,2015:20-21.

[19] ZENG Fang-fang, GE Zhi-wei, LIMWACHIRANON J, et al. Antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of Rosa roxburghii fruit and identification of main bioactive phytochemicals by UPLC-Triple-TOF/MS [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017, 52(4): 897-905.

[20] 高林晓,郭蒙,黄绍敏,等. 正交试验优选刺三加茎、叶中总多酚的提取工艺及含量测定研究[J]. 化学试剂,2019,41(7):743-749.

[21] 王萌萌,谢典,周育芳,等. 山慈菇中总黄酮的提取工艺优化[J]. 中国药房,2019,30(14):1 949-1 952.

[22] 张毅,王洪云,钮福祥,等."宁紫薯 1 号"花青素组分鉴定及其对大鼠高脂诱导肥胖的预防效果[J]. 中国农业科学,2016,49(9):1 787-1 802.

[23] 周翠,韩成云,赵志刚. 紫薯、黑米、葡萄皮的花青素抗氧化性和稳定性的比较[J]. 食品工业,2018,39(6):164-168.

[24] 张盼盼,王丽,时志军,等. 蓝莓果渣花青素的超声辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械,2017,33(2):152-157,210.

[25] 庄星光,韩春然,马蕊,等. 蓝靛果花青素的提取及稳定性研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2019,35(3):313-315,338.

(下转第 229 页)

[46] RAIMBAULT M, GEMMON J C. Procédé d'enrichissement en protéines de produits comestibles solides[J]. French Patent, 1976, 76(6): 677.

[47] DURAND A, DE LA D B, BLACHERE H. Laboratory scale bioreactor for solid state processes[J]. Journal of Biotechnology, 1988(8): 59-66.

[48] 韩北忠. 滚筒式生物反应器固态发酵的应用研究[J]. 中国农业大学学报, 2001(2): 96-100.

[49] RAGHAVARAO K S M S, RANGANATHAN T V, KARANTH N G. Some engineering aspects of solid-state fermentation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 13(2/3): 127-135.

[50] WANG Er-qiang, LI Shi-zhong, TAO Ling. Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid-state fermentation[J]. Applied Energy, 2010, 87(9): 2 839-2 845.

[51] LI Shi-zhong, LI Guang-ming, ZHANG Lei. A demonstration study of ethanol production from sweet sorghum stems with advanced solid state fermentation teehnology[J]. Appl Energy, 2013, 102(2): 260-265.

[52] PANDIT J B, JOSHI J B. Mixing in mechanically agitated gas-liquid contactors bubble columns and modified bubble columns [J]. Chemical Engineering Science, 1983, 38(8): 1 181-1 215.

[53] WARD A J, HOBBS P J, HOLLIMAN P J. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17): 7 928-7 940.

[54] 严玉平, 陈葵, 陈庆隆, 等. 卧式厌氧发酵反应器: 中国, 204702749U[P]. 2015-10-14.

[55] NAGEL F J J L, TRAMPER J, BAKKER M S N, et al. Temperature control in a continuously mixed bioreactor for solid-state fermentation[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 72(2): 219-230.

[56] 陈俊英, 韩秀丽, 李洪亮, 等. 压力脉动用于固态发酵过程的研究进展[J]. 酿酒科技, 2009(11): 17-20, 23.

[57] 黄鑫泉. 压力脉动生物反应器与固态发酵[J]. 化工科技市场, 2000(3): 5-7.

(上接第 209 页)

[16] 易婕, 刘云宏, 李海登, 等. 紫薯远红外辐射干燥及品质特性[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 160-167.

[17] 张磊, 余筱洁, 白竣文, 等. 红外干燥方式对紫甘蓝干燥特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(12): 202-209, 176.

[18] NG M X, THAM T C, ONG S P, et al. Drying kinetic s of technical specified rubber[J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 2(1): 64-71.

[19] 邰晓亮, 刘莹, 刘淑华, 等. 太阳能干制花菜干复水效果的研究[J]. 农产品加工, 2018(15): 9-12.

[20] 杜利平, 闫慧娇, 王晓, 等. 玫瑰花低温干燥过程中生理特性及功效成分的变化研究[J]. 食品科技, 2016(2): 59-64.

[21] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 预处理对压差闪蒸干燥丰水梨脆片品质及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 73-78.

[22] 陈莹, 何艾婧, 古丽菲热·伊力哈木, 等. 不同干燥方式对玫瑰花外观和成分保留的影响[J]. 食品工业, 2017(8): 122-125.

[23] IOANNOU I, PERROT N, HOSSENLOPP J, et al. The fuzzy set theory: A helpful tool for the estimation of sensory properties of crusting sausage appearance by a single expert[J]. Food Quality and Preference, 2002, 13(7): 589-595.

[24] HOGENKAMP P S, STAFLEU A, MARS M, et al. Texture, not flavor, determines expected satiation of dairy products[J]. Appetite, 2011, 57(3): 635-641.

[25] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 不同护色预处理对牛蒡片真空冷冻干燥特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 86-91.

(上接第 221 页)

[26] 阎欲晓, 粟桂娇, 何勇强. 黑曲霉固态发酵对甘蔗叶酚类物质释放及抗氧化活性的影响[J/OL]. 食品科学 (2019-10-12) [2019-11-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191012.1129.048.html.

[27] WANG Jia-hong, CAO Fu-liang, SU Er-zheng, et al. Improving flavonoid extraction from Ginkgo biloba Leaves by prefermentation processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(24): 5 783-5 791.

[28] VATTEM D A, LIN Y T, LABBE R G, et al. Phenolic antioxidant mobilization in cranberry pomace by solid-state bioprocessing using food grade fungus Lentinus edodes and effect on antimicrobial activity against select food borne pathogens[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004, 5(1): 0-91.

[29] CAI Sheng-bao, HUANG Chen, JI Bao-ping, et al. In vitro antioxidant activity and inhibitory effect, on oleic acid-induced hepatic steatosis, of fractions and subfractions from oat (*Avena sativa* L.) ethanol extract[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 900-905.

[30] XU Chen, JI Geun-eog. Bioconversion of flavones during fermentation in milk containing scutellaria baicalensis extract by *Lactobacillus brevis*[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, 23(10): 1 422-1 427.

[31] 马奕瑜, 陈静慧, 王洪新, 等. 铁皮石斛花色苷稳定性及热降解动力学研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 50-57.

[32] 尹姿, 张曦, 郑楠, 等. 笃斯越桔花青素在不同 pH 条件下热稳定性的研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(12): 157-161.