

响应面法优化草莓酵素的 发酵工艺及其生物活性初探

崔国庭,王 缙,刘向丽,任国艳,郭金英,王 萍
(河南科技大学食品与生物工程学院,河南洛阳 471023)

摘 要:研究草莓酵素制备的最优发酵工艺及其体外抗氧化活性。在单因素实验的基础上,以酵母菌接种量、发酵时间、发酵温度为自变量,SOD 为响应值,通过响应面法对草莓酵素的最佳发酵工艺,进行了优化。结果表明,当酵母菌接种量为 1.5%、发酵时间为 13.5 h、发酵温度为 35 ℃时,SOD 值可达 35.98 U/mL。体外抗氧化实验表明,初期草莓酵素具有较强的羟自由基清除能力(79.38%)、DPPH 自由基清除能力(88.89%)、超氧阴离子自由基清除能力(74.40%)和还原力(0.542),但其体外抗氧化能力随着贮藏时间的延长有不同程度的降低。草莓酵素中 SOD 活性最强。草莓酵素具有良好的开发利用前景。

关键词:草莓酵素,响应面,抗氧化活性,SOD

Optimization of fermentation process of strawberry-Jiaosu by response surface methodology and the primary study of bioactivity

CUI Guo-ting, WANG Duan, LIU Xiang-li, REN Guo-yan, GUO Jin-ying, WANG Ping

(College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Study on the optimum fermentation process and its antioxidant activity and related enzyme activity in strawberry-Jiaosu. On the basis of single factor experiment, the best fermentation process of strawberry-Jiaosu was optimized by the response surface method with yeast inoculation amount, fermentation time, fermentation temperature as independent variable and SOD as response value. The results showed that when the inoculation amount of yeast was 1.5%, the fermentation time was 13.5 h, and the fermentation temperature was 35 ℃, the SOD value was 35.98 U/mL. *In vitro* antioxidant test showed that strawberry-Jiaosu had strong hydroxyl free radical scavenging ability (79.38%), DPPH radical scavenging ability (88.89%), superoxide anion free radical scavenging ability (74.40%) and reducing power (0.542). But its antioxidant capacity *in vitro* with the storage time to extend the degree of reduction to varying degrees. The results of enzyme activity in strawberry-Jiaosu showed that SOD activity was the strongest, followed by lipase, and the activity of amylase was the lowest. It was suggested that the strawberry-Jiaosu might have a good prospect.

Key words: strawberry-Jiaosu; response surface methodology; antioxidant activity; superoxide dismutase

中图分类号: TS201.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2018)09-0143-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2018.09.025

引文格式: 崔国庭,王缙,刘向丽,等. 响应面法优化草莓酵素的发酵工艺及其生物活性初探[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 143-148.

草莓是蔷薇科草莓属多年生草本植物,果实色泽鲜艳、酸甜可口、风味独特,素有“水果皇后”的美誉^[1]。草莓富含人体必需的营养物质,尤其是 V_C、V_E 和多酚类化合物等抗氧化物质^[2-3],草莓所含的抗氧化物质能够防护、清除和修护机体中产生的过量自由基,保护机体免受自由基的伤害^[4],具有降低心血管慢性疾病和癌症等的作用^[5]。草莓不耐储藏和运输,成为了限制草莓产业发展的瓶颈。因此,草莓产品的开发及草莓的保鲜技术研究成为了草莓产业发

展的关键所在。草莓产品目前主要有果酱^[6]、果汁^[7]、果酒^[8]等。

酵素是以一种或几种水果、蔬菜等为原料,经过微生物(酵母、乳酸菌)发酵产生的含有丰富维生素、酶、矿物质和次生代谢产物的功能性产品^[9-11]。水果酵素具有抗氧化、平衡内分泌、活化细胞、美容养颜、提高身体免疫和增强身体抵抗力等功效^[12-13]。草莓酵素是以草莓为原料,经益生菌发酵后获得的含有多种维生素、矿物质和代谢产物等功能性发酵产品。

收稿日期: 2017-08-28

作者简介: 崔国庭(1978-),男,博士,讲师,主要从事农产品深加工的研究与开发方面的研究, E-mail: cuiguoting1978@163.com。

基金项目: 河南科技大学博士启动基金(4009-13480049)。

将草莓制成草莓酵素,是草莓深加工过程中最有潜力的加工方式之一,不仅延长了草莓产品的货架期,也提升了草莓的附加值。目前,国内外缺少有关草莓酵素研究与应用的报道。

本文以草莓为实验原料,通过响应面法优化草莓酵素的发酵工艺,以确定草莓酵素的最佳发酵条件,同时测定草莓酵素中酶的活性,并以羟基自由基清除率、DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基清除率和还原力为考察指标,研究贮藏过程中草莓酵素体外抗氧化性能的变化规律,为草莓酵素的开利用和相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

草莓和安琪酵母(生产日期 2017.03.01) 丹尼斯超市;盐酸、三羟甲基氨基甲烷、邻苯三酚、EDTA、三氯化铁、三氯乙酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼、聚乙烯醇、3,5-二硝基水杨酸 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;硫酸亚铁、铁氰化钾、Tris、氢氧化钠、可溶性淀粉 分析纯,天津德恩化学试剂有限公司。

725 型紫外可见分光光度计 天津精密科学仪器有限公司;MIR-254 恒温培养箱、HH-S 水浴锅 上海精密科学仪器有限公司;FA2004B 型电子天平 上海心仪器仪表科技有限公司;EPPENDORF 型移液枪、GTR21-1 高速离心机 北京精密仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 草莓酵素的制备 草莓洗净、晾干,按草莓:白砂糖 = 3:1 (w/w) 的比例将草莓和白砂糖放入含有 0.3% V_c + 0.5% 柠檬酸的去离子水(水:草莓 = 8:1 w/w)中,护色、打浆,按比例接入酵母进行发酵,发酵结束后,发酵液过滤,获得草莓酵素。将所获得的草莓酵素离心,取上清液待测。

1.2.2 测定方法 取获得的草莓酵素上清液,进行超氧化物歧化酶(SOD)活力测定,SOD 活性的测定采用邻苯三酚自氧化法^[14],淀粉酶测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[15],脂肪酶测定采用滴定法^[16]。

1.2.3 草莓酵素制备单因素实验

1.2.3.1 酵母接种量 酵母接种量分别以 0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 添加,在 30 ℃ 条件下发酵 15 h,发酵结束后采用邻苯三酚的自氧化法测定 SOD 活性,重复三次,考察酵母菌接种量对 SOD 活性的影响,以确定酵母适宜接种量。

1.2.3.2 发酵时间 30 ℃ 条件下接种 1% 酵母菌,分别发酵 6、9、12、15、18、21、24 h,发酵结束后测定 SOD 活性,重复三次,考察发酵时间对 SOD 活性的影响,确定适宜发酵时间。

1.2.3.3 发酵温度 接种 1% 酵母菌,在 20、25、30、35、40、45 ℃ 条件下发酵 12 h,发酵结束后测定 SOD 活性,重复三次,考察发酵温度对 SOD 活性的影响,确定适宜发酵温度。

1.2.4 响应面实验 根据单因素实验结果,根据 Box-Behnken 实验设计原理,以发酵温度、发酵时间、

酵母菌接种量为自变量进行组合优化,以 SOD 活性为响应值,进行响应面分析。实验设计方案如表 1 所示,采用 Design expert 8.0.6 软件进行数据处理和回归分析,获得酵素发酵的最佳工艺条件。

表 1 Box-Behnken 实验设计因素水平

Table 1 Factors and levels of the Box-Behnken experiment

因素	编码水平		
	-1	0	1
A 酵母菌接种量(%)	0.5	1	1.5
B 发酵时间(h)	9	12	15
C 发酵温度(℃)	25	30	35

1.2.5 草莓酵素的抗氧化活性实验

1.2.5.1 对超氧阴离子自由基清除作用的测定 取 4.5 mL 0.05 mL pH8.2 的 Tris-HCl 于试管中,在 25 ℃ 恒温水浴锅水浴 20 min。然后在试管中加入 0.1 mL 样品液和 0.9 mL 去离子水,然后加入 0.4 mL 25 mmol/L 邻苯三酚,混匀后在 25 ℃ 恒温水浴锅水浴 5 min,最后加入 1 mL 8 mol/L HCl 结束加样。以 Tris-HCl 作参比溶液。调节紫外分光光度计在 299 nm 下测定吸光度^[17]。实验以 1 mL 试样代替样品液作空白对照。

$$\text{清除率}(\%) = \frac{A_{\text{空白}} - A_{\text{样品}}}{A_{\text{空白}}} \times 100$$

1.2.5.2 对羟自由基清除作用的测定 取 0.5 mL 样品于试管中,然后依次加入 1.4 mL 6 mmol/L 双氧水、0.6 mL 20 mmol/L 水杨酸钠和 2 mL 1.5 mmol/L 硫酸亚铁,混合充分后,在 37 ℃ 恒温水浴 1 h。以去离子水作参比溶液。调节分光光度计在 562 nm 测定吸光度^[18]。

$$\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100$$

1.2.5.3 对 DPPH 自由基清除作用的测定 参考文献[19-20]的方法,并进行适当的修改。取 2 mL 样品溶液,加入等体积的 DPPH 溶液(0.1 mmol/L),在微型旋涡混合仪上摇匀,在室温条件下,避光放置 30 min,在波长 517 nm 处测定吸光度值。DPPH 的清除率按以下公式进行计算:

$$\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100$$

1.2.5.4 还原力测定 取 0.5 mL 样品液于试管中,然后在试管中加入 2.5 mL 10 g/L 铁氰化钾,混匀后在 50 ℃ 下反应 30 min,然后加入 2.5 mL 0.1 g/mL 三氯乙酸,混匀后在离心机中以 3000 r/min 转速下离心 10 min。离心后取 2.5 mL 上清液,然后依次加入 2.5 mL 去离子水、0.5 mL 1 g/L 三氯化铁,混匀。以去离子水作参比溶液,调节分光光度计在 700 nm 下测定吸光度^[21]。样品吸光度值越大,表明还原力越强。

1.3 数据处理

实验进行 3 次重复操作,实验数据处理、统计分析和图表绘制采用 Design-Expert 8.0.6 和 GraphPad.Prism 5.0 软件。

2 结果与分析

2.1 酵母菌发酵单因素实验

以 SOD 活性为评价指标,考察草莓酵素在发酵过程中,酵母菌接种量、发酵时间和发酵温度对酵母发酵过程中产生的 SOD 活性的影响,结果见图 1。

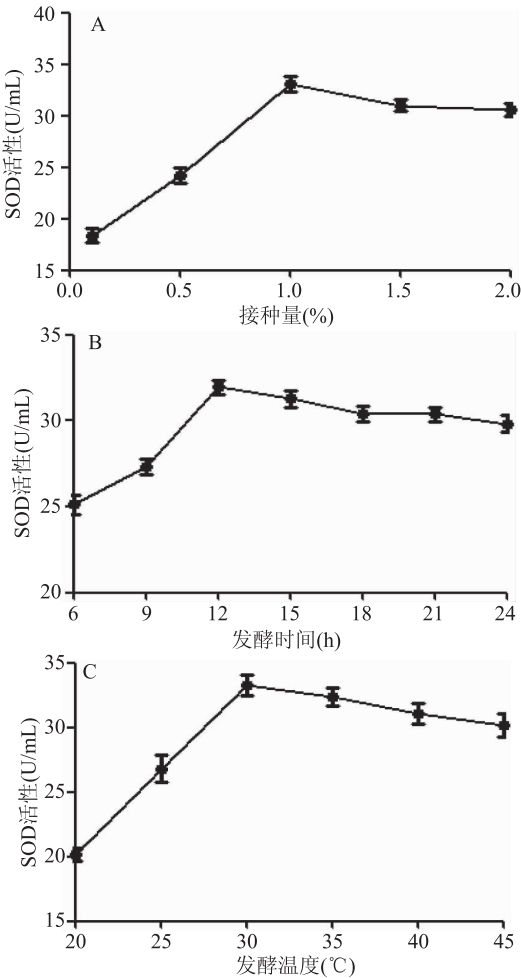


图1 接种量(A)、发酵时间(B)和发酵温度(C)对 SOD 活性的影响

Fig.1 Effect of inoculation amount(A), fermentation time(B) and fermentation temperature(C) on SOD activity

由图 1(A)可得,酵母接种量在 0.1%~1.0% 之间时,随着接种量的增加,SOD 活性呈上升趋势,当接种量达到 1.0%,SOD 活性达到最高 33.04 U/mL;当接种量在超过 1.0% 以后,随着酵母接种量的增加,SOD 活性呈下降趋势。这可能是随着酵母接种量的增加,在发酵的后期,由于糖被消耗完,菌体开始利用有机酸作为碳源,pH 随着有机酸的消耗而上升。pH 的改变引起了 SOD 活性的下降。因此,选择 1.0% 的接种量,SOD 活力最高。

由图 1(B)可得,随着发酵时间的延长,SOD 活力上升,当发酵时间达到 12 h,SOD 活力达到顶峰,再延长发酵时间,SOD 活力趋于平缓并略有降低。这可能是在发酵后期,糖被消耗殆尽,继续延长发酵时间,菌体以有机酸为碳源进行发酵,造成了 pH 的改变,从而引起了 SOD 活性的变化。因此发酵时间控制在 12 h,SOD 活力最高。

由图 1(C)可得,在发酵温度低于 30 ℃ 时,随着发酵温度的升高,SOD 活性也随之增加,当发酵温度为 30 ℃,SOD 活性达到 33.27 U/mL。当发酵温度进一步升高,SOD 的活性呈下降趋势,可能是发酵温度过高,超出了酵母的最适发酵温度,酵母发酵能力降低造成的影响,因此发酵温度控制在 30 ℃,SOD 活力最高。

2.2 响应面法优化

2.2.1 Box-Behnken 实验结果及方差分析 在单因素实验的基础上,以酵母菌接种量(A)、发酵时间(B)和发酵温度(C)三个因素为自变量,以 SOD 活性为响应值,优化草莓酵素的发酵工艺。结果见表 2。利用 Design Expert 8.0.6 软件,对表 2 的数据建立二次回归模型,拟合的二次多元回归方程如下:

$$Y = 34.1 + 1.8A + 1.2B + 1.2C - 0.15AB + 0.85AC - 0.55BC - 0.25A^2 - 0.555B^2 - 0.705C^2$$

表 2 响应面实验方案与结果

Table 2 Response surface experiment scheme and results				
实验号	A	B	C	Y:SOD 活性 (U/mL)
1	0	-1	1	33.4
2	0	0	0	34.1
3	1	0	-1	33.2
4	-1	-1	0	30.5
5	0	1	1	34.9
6	-1	1	0	33.0
7	1	-1	0	34.1
8	-1	0	-1	31.0
9	0	0	0	33.9
10	1	1	0	36.0
11	0	0	0	34.5
12	0	0	0	34.3
13	0	-1	-1	29.8
14	1	0	1	37.2
15	0	1	-1	33.5
16	-1	0	1	31.6
17	0	0	0	34.0

由表 3 可得,模型 $p < 0.0001$,达到极显著 ($p < 0.01$) 水平,失拟项 $p = 0.3207 > 0.05$,不显著,表明模型选择合适,拟合度良好。 $R^2 = 0.9911$ 表明该模型对实验点的适配度达到 99.11%,具有较高的拟合度,实验误差较小,可以利用该模型预测上述发酵条件对酵素中 SOD 活力的影响。各因素的 p 值可以看出,回归模型中的 A、B、C、AC、BC、 B^2 和 C^2 影响极显著 ($p < 0.01$),交互项 AB 及二次项 A^2 影响均不显著 ($p > 0.05$),表明各因素对 SOD 活性的影响不同,调整不同因素将达到不同的提取效果。

2.2.2 响应曲面和等高线图分析 响应面实验结果采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行分析,获得了接种量、发酵时间、发酵温度三个因素之间的交互作用影响。由图 2A 可以看出,等高线图呈椭圆形,表明接种量和发酵温度交在实验范围内互作用显著,图 2B 显示响应面显示坡度较陡峭,表明 SOD 活性随着接

表3 方差分析表

Table 3 Analysis of variance table

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	p 值	显著性
模型	9	57.04	6.34	86.65	<0.0001	**
A	1	25.92	25.92	354.38	<0.0001	**
B	1	11.52	11.52	157.50	<0.0001	**
C	1	11.52	11.52	157.50	<0.0001	**
AB	1	0.090	0.090	1.23	0.3040	
AC	1	2.89	2.89	39.51	0.0004	**
BC	1	1.21	1.21	16.54	0.0048	**
A ²	11	0.18	0.18	2.42	0.1638	
B ²	1	1.30	1.30	17.73	0.0040	**
C ²	1	2.09	2.09	28.61	0.0011	**
残差	7	0.51	0.073			
失拟项	3	0.28	0.093	1.61	0.3207	
纯误差	4	0.23	0.058			
总离差	16	57.56				
R ²		0.9911				

注:** 差异极显著($p < 0.01$), * 差异显著($p < 0.05$)。

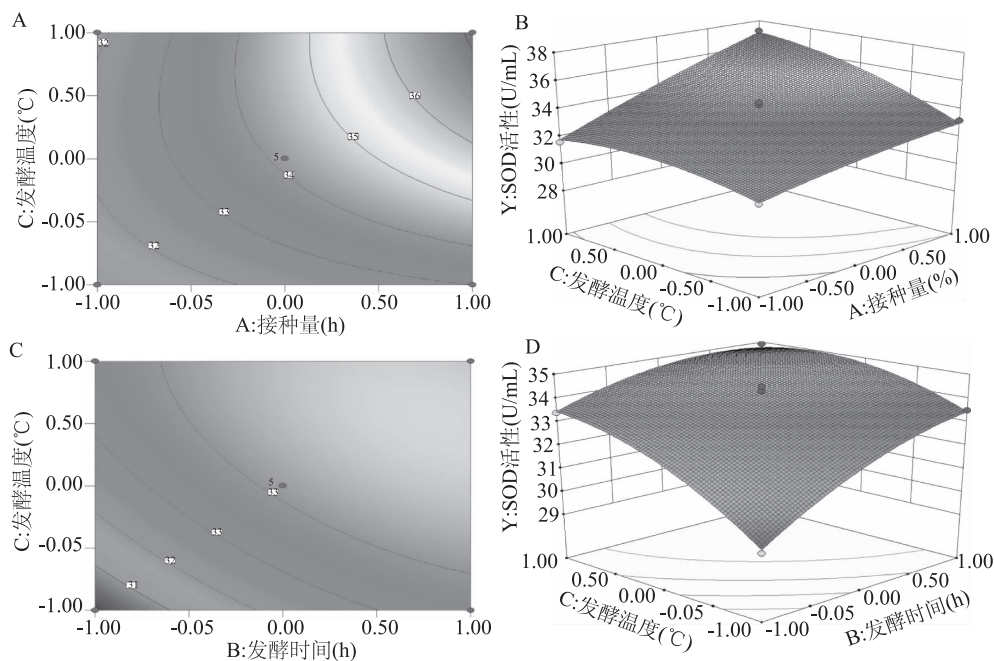


图2 各因素交互作用对 SOD 活性影响的等高线与响应面图

Fig.2 Contour graph and response surface plot for the effect of various factors on the activity of SOD

种量和发酵温度变化响应敏感,这与方差分析结果一致。图2D为接种量为1%时,发酵温度和发酵时间对SOD活性的交互作用。当发酵温度一定时,随着发酵时间的延长,SOD活性先增大后趋于平缓;当发酵时间一定时,随着发酵温度的增加,SOD活性先增大后减小的趋势。等高线密集,表明响应值(SOD活性)在实验条件内存在极高值,交互作用显著,与分析结果一致。

2.3 验证性实验

从响应面实验分析获得最佳工艺条件:接种量为1.5%、发酵时间为13.35 h、发酵温度为35℃,此条件下SOD活性预测值为37.21 U/mL。为了验证模

型预测的准确性,采用响应面优化后的工艺条件进行草莓酵素的制备,考虑到实际操作的便利,将发酵工艺条件修正为:接种量为1.5%、发酵时间为13.5 h、发酵温度为35℃。发酵所得酵素的SOD活性为 (35.98 ± 1.53) U/mL,与预测值37.21 U/mL无显著差异,说明模型可以很好的预测草莓酵素的发酵工艺。

2.4 草莓酵素贮藏期间抗氧化活性的变化

由图3可知,草莓酵素在实验的贮藏期内,体外抗氧化能力总体呈现下降趋势。草莓酵素在贮藏初期羟自由基清除率(3A)、DPPH自由基清除率(3B)、超氧阴离子自由基清除率(C)和还原力(D)分别为

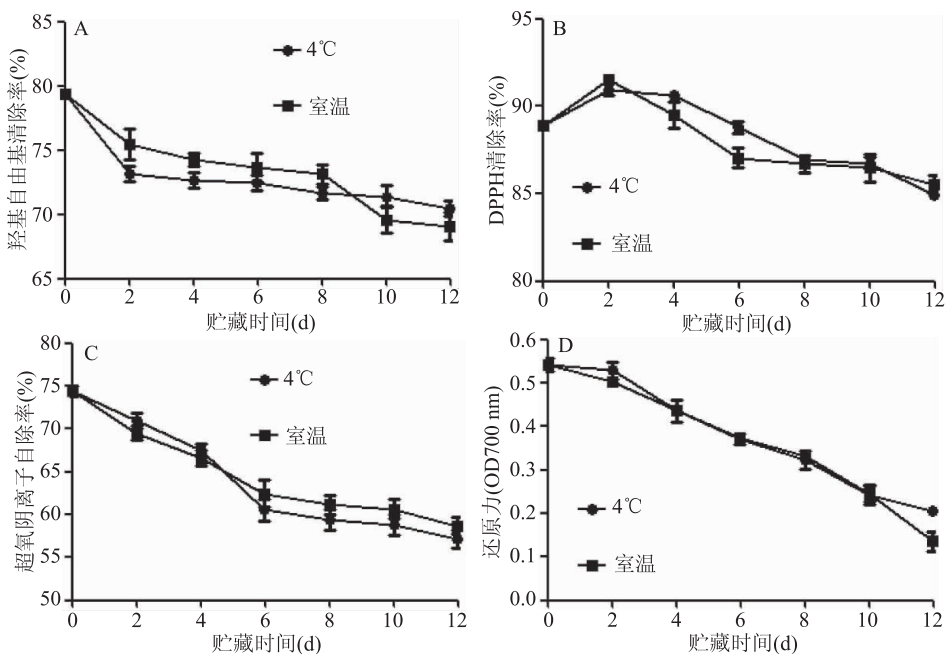


图3 贮藏过程中草莓酵素体外抗氧化能力的变化

Fig.3 Changes of antioxidant activity of strawberry-Jiaosu *in vitro* during fermentation

注:A:羟基自由基清除率,B:DPPH 清除率,C:超氧阴离子自由基清除率,D:还原力。

79.38%、88.89%、74.40%和0.542;在4℃和室温下贮藏12d后,羟自由基清除率(3A)分别下降至70.48%和69.08%,DPPH自由基清除率(3B)分别下降至84.94%和85.51%,超氧阴离子自由基清除率(C)分别下降至57.15%和58.69%,还原力(D)分别下降至0.205和0.137。

草莓酵素的抗氧化能力与其所含的小分子糖、多糖、多酚类化合物及SOD等活性成分含量有关。草莓酵素的体外的抗氧化能力可能与酵素内所含的V_C、V_E和多酚类化合物等抗氧化物质有关。随着贮藏时间的延长,酵素体外抗氧化能力降低可能与酵素里的部分活性成分如V_C、V_E、多酚被氧化破坏和SOD失活有关。因此,酵素在贮藏期间的稳定性和酵素抗氧化能力下降的机制需进一步研究。

2.5 草莓酵素的酶活性

对草莓酵素中的SOD、脂肪酶和淀粉酶活力进行测定,结果如图4所示。

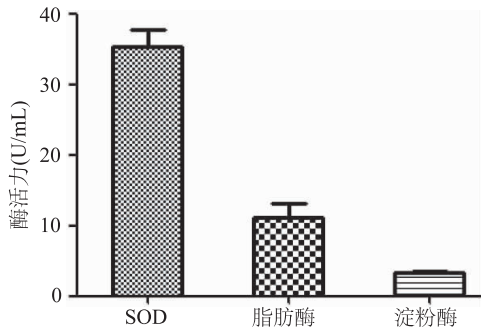


图4 草莓酵素中SOD、脂肪酶和淀粉酶活力

Fig.4 The enzyme activity of SOD, lipase and amylase in strawberry-Jiaosu

从图4可以看出,草莓酵素中SOD、脂肪酶和淀粉酶活力分别为35.4、11.2、3.26 U/mL。SOD活性较

高,这表明草莓酵素较高的抗氧化能力与其SOD活性有关,具有较好的保健和美容功效;草莓酵素脂肪酶活力次之,表明其也有一定的助脂肪消化的功效;草莓酵素淀粉酶活性不高,对淀粉的助消化能力有限。

3 结论

在单因素实验的基础上,以发酵剂添加量、发酵时间、发酵温度为自变量,以SOD为响应值,通过响应面法优化并获得了草莓酵素的最佳发酵工艺:接种量为1.5%、发酵时间为13.5h、发酵温度为35℃。体外抗氧化实验研究结果显示:草莓酵素具有羟自由基清除能力(79.38%)、DPPH自由基清除能力(88.89%)、超氧阴离子自由基清除能力(74.40%)和还原力(0.542),草莓酵素的体外抗氧化能力随着贮藏时间的延长都有不同程度的降低。草莓酵素中酶活性测定表明,SOD活性最强,脂肪酶次之,淀粉酶活性最低。草莓酵素具有良好的开发应用潜力。

参考文献

- [1] 罗学兵,贺良明.草莓的营养价值与保健功能[J].中国食物与营养,2011,17(4):74-76.
- [2] 程然,生吉祥.草莓多酚类植物化学物研究进展[J].食品安全质量检测学报,2015,7(2):575-584.
- [3] 严嘉玮,路洪艳,李莉,等.2种草莓成熟过程中果实特征品质指标的变化[J].食品科学,2017,38(4):125-132.
- [4] 潘瑶,郑时莲,邹兴平,等.葡萄、芒果、草莓乙醇提取物抗氧化活性组分分析及其抗氧化相互作用[J].食品科学,2017,38(4):133-140.
- [5] Giampieri F, Alvarezsuarez J M, Battino M. Strawberry and human health: Effects beyond antioxidant activity[J]. Journal of

Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(18): 3867-3876.

[6] 王中风, 韦田, 刘燕, 等. 基于渗透脱水的草莓魔芋酱加工工艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 215-218, 230.

[7] 柳青, 赵晓燕, 张超, 等. 超高压处理对草莓汁贮藏期微生物及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 111-117.

[8] 王孝荣, 罗佳丽, 潘年龙, 等. 草莓果酒酿造工艺的优化及其香气成分分析[J]. 食品科学, 2014, 35(7): 196-201.

[9] 赵芳芳, 莫雅雯, 蒋增良, 等. 功能性微生物酵素产品的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7): 283-287.

[10] 马麦生, 谭明, 赵乃昕, 等. 酵素菌中酵母菌的分离鉴定[J]. 潍坊医学院学报, 2002, 24(2): 81-85.

[11] 吴薇, 盖宝川, 籍保平. 红茶菌混合菌种的分离与鉴定[J]. 食品科学, 2004, 25(4): 56-58.

[12] 刘加友, 王振斌. 微生物酵素食品研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 273-276.

[13] 张思, 王蕾, 张志旭, 等. 16 种市售酵素食品功能分析与评价[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 196-200, 204.

[14] 徐雅娟, 赵艳景, 胡虹. 邻苯三酚自氧化法测定超氧化物歧化酶活性的研究[J]. 西北民族大学学报: 自然科学版, 2006, 32(6): 1207-1209.

[15] 宋阳, 王亚琼, 赵丽恋, 等. 基于淀粉酶活性检测的麦芽质量评价方法[J]. 药学进展, 2010, 34(9): 411-417.

[16] 董银卯, 何聪芬, 王领, 等. 火龙果酵素生物活性的初步研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 192-196.

[17] Nishikimi M, Appaji N, Yagi K. The occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1972, 46(2): 849-854.

[18] Xiong S L, Li A, Huang N, et al. Antioxidant and immunoregulatory activity of different polysaccharide fractions from tuber of Ophiopogon japonicus [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(3): 1273-1280.

[19] Cui G, Zhang W, Zhang A, et al. Variation in antioxidant activities of polysaccharides from Fructus Jujubae in South Xinjiang area [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 57: 278-284.

[20] Wang Y, Yang Z, Wei X. Antioxidant activities potential of tea polysaccharide fractions obtained by ultra filtration [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50(3): 558-564.

[21] Yen W J, Chang L W, Duh P D. Antioxidant activity of peanut seed testa and its antioxidative component, ethyl protocatechuate [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2005, 38(3): 193-200.

(上接第 142 页)

[29] 曾丽芬. 超声波在食品干燥中的应用[J]. 广东化工, 2008, 35(2): 49-51.

[30] Zheng Liyun, Sun Dawen. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2005, 17(1): 16-23.

[31] Solomon O, Svanberg U, Sahlstrom A. Effect of oxygen and fluorescent light on the quality of orange juice during storage at 8 °C [J]. Food Chemistry, 1995, 53: 363-368.

[32] 马芳, 李发琪, 王智彪. 超声空化效应的研究进展[J]. 临床超声医学杂志, 2003, 5(5): 292-294.

[33] Deng Y, Zhao Y. Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji) [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85: 84-93.

[34] Sumnu G, Turabi E, Oztop M. Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination modes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38: 549-553.

[35] Davey MW, Van Montagu M, Inzé D, et al. Plant L-ascorbic acid: Chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80: 825-860.

全国中文核心期刊
轻工行业优秀期刊