

葡萄皮酵素发酵工艺优化及其抗氧化活性

唐海轮,袁嘉豪,崔海林,卢洋,简清梅*,李蓉*

(荆楚理工学院 特色食品功能挖掘与综合利用研究中心,湖北 荆门 448000)

摘要:以葡萄皮为主要原料,利用酵母和植物乳杆菌混合发酵制备酵素,对其发酵工艺进行研究。通过单因素试验研究混合发酵菌种接种量、白砂糖添加量、发酵温度、发酵时间对葡萄皮酵素中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)酶活力的影响,再结合正交试验确定制备葡萄皮酵素的最佳工艺条件,并比较葡萄皮发酵前后总酚含量、总黄酮含量以及抗氧化活性的变化。结果表明,葡萄皮酵素发酵最佳工艺条件为混合发酵菌种接种量 0.6%、白砂糖添加量 12%、发酵温度 35 °C、发酵时间 36 h。在此条件下,制备的酵素中 SOD 酶活力为(62.34±0.67) U/mL,总酚含量为(205.62±5.18) mg 没食子酸/100 mL,总黄酮含量为(96.47±1.21) mg 芦丁/100 mL。此外,与未发酵相比,葡萄皮酵素可以明显提高 DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺自由基清除率。

关键词:葡萄皮酵素;发酵工艺优化;SOD 酶活力;总酚;黄酮;抗氧化

Fermentation Process Optimization and Antioxidant Activity of Grape Skin Enzyme

TANG Hailun, YUAN Jiahao, CUI Hailin, LU Yang, JIAN Qingmei*, LI Rong*

(Characteristic Food Function Mining and Comprehensive Utilization Research Center, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, Hubei, China)

Abstract: With Grape skin as the raw material, this paper used the mixed fermentation of yeast and *Lactobacillus plantarum* to prepare the grape skin enzyme, and studied its fermentation process. Besides, this paper studied the effect of mixed strain inoculation amount, white sugar addition amount, fermentation temperature, and fermentation time on the activity of superoxide dismutase (SOD) in the grape skin enzyme through single factor experiment, determined the optimal fermentation process conditions of grape skin enzyme preparation through orthogonal test, and compared the changes of total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant activity of grape skin enzyme before and after fermentation. The results showed that the optimal fermentation process conditions were 0.6% mixed strains inoculated amount, 12% sugar addition amount, fermentation temperature of 35 °C, and fermentation time of 36 h. Under this condition, the SOD activity in the prepared enzyme was (62.34±0.67) U/mL, and the total phenolic and flavonoids contents were (205.62±5.18) mg GAE/100 mL and (96.47±1.21) mg Rutin/100 mL respectively. Furthermore, compared with unfermented conditions, the DPPH radical scavenging rate and ABTS⁺ radical scavenging rate were significantly increased by grape skin enzyme.

Key words: grape skin enzyme; fermentation process optimization; superoxide dismutase enzyme activity; phenolics; flavonoids; antioxidant activity

引文格式:

唐海轮,袁嘉豪,崔海林,等.葡萄皮酵素发酵工艺优化及其抗氧化活性[J].食品研究与开发,2025,46(4):93-99.

TANG Hailun, YUAN Jiahao, CUI Hailin, et al. Fermentation Process Optimization and Antioxidant Activity of Grape Skin Enzyme[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 93-99.

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20234303);湖北省大学生创新创业训练计划项目(S202411336029、S202411336030)

作者简介:唐海轮(2000—),男(汉),本科在读,研究方向:农产品加工及贮藏。

*通信作者:简清梅(1975—),女(汉),教授,硕士,研究方向:农产品加工及贮藏;李蓉(1987—),女(汉),副教授,博士,研究方向:农产品加工及贮藏。

葡萄属于葡萄科,落叶藤本植物,在我国种植面积广^[1]。葡萄除了直接鲜食,还可以制作果汁及酿造葡萄酒。研究表明,葡萄皮中含有大量对人体健康有益的活性成分,包括花色苷类、黄烷醇类、黄酮醇类等^[2]。葡萄皮中的花色苷不仅是天然色素,也是天然抗氧化剂和天然防腐剂,具有抗衰老、改善视觉功能等作用^[3-4]。此外,葡萄皮中的多酚还具有延缓皮肤衰老、预防心脑血管疾病、降低胆固醇等多种生理活性^[5-6]。研究还显示葡萄皮中的多酚类物质及其制备的复合抗氧化剂对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌等有显著的抑制效果^[7]。葡萄皮中的多酚还可以应用于食用油及烤肉产品中,降低油脂氧化及烤肉中多环芳烃的积累^[8-9]。然而,作为果汁和酿造行业的副产物,葡萄皮往往被大量废弃,不仅对环境有污染而且造成了资源的浪费。

酵素是一种以天然果蔬或中草药为原料,经过酵母、乳酸菌等混合发酵而成的具有特定功能性成分且对人体健康有益的产品^[10]。由于酵母和乳酸菌的生长代谢会产生大量的有机酸、氨基酸、醇类等代谢产物,具有促进消化吸收、增强芳香味、提高产品营养价值等作用,因此广泛用于食用酵素的生产中^[11-12]。酵素因富含超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、黄酮类、多酚类、氨基酸等生理活性成分而具有抗氧化、调节免疫与糖脂代谢、抑菌、抗炎等多种生理功能^[13-15]。在果蔬酵素产品制备过程中,发酵菌种的选择尤为重要。其中酵母在生长代谢过程中可以产生一些对人体有益的活性物质,而植物乳杆菌在发酵过程中也可以产生大量的有机酸、醇类等物质,具有促进消化的作用,因此常用于果蔬酵素的制备。目前,已有学者利用食品加工副产物百香果皮、凤梨皮等作为原料开发酵素产品,提高了产品的附加值^[16-17]。而葡萄皮作为葡萄加工行业的副产物并未得到有效利用,目前关于葡萄皮酵素的研究报道较少。本研究以葡萄皮为原料,加入酵母菌和植物乳杆菌进行混合发酵,并通过优化发酵工艺条件,制备抗氧化能力和有益活性成分均有效提高的酵素产品,以期为提高葡萄的经济效益、促进葡萄产业的可持续发展提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

新鲜成熟的巨峰葡萄、白砂糖:市售;植物乳杆菌:西安米先尔生物科技有限公司;酵母菌:安琪酵母股份有限公司;福林酚:国药集团化学试剂有限公司;1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH):美国 Sigma 公司;2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)ABTS]、芦丁:上海阿拉丁生化科技

股份有限公司;维生素 C:北京博奥拓达有限公司;没食子酸:上海麦克林生化科技股份有限公司;SOD 试剂盒:南京建成生物工程研究所。所用化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

BSP-100 生化培养箱:上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;TU-1901 双光束紫外分光光度计:北京普析通用仪器有限责任公司;L18-Y933 破壁机:九阳股份有限公司;JY10002 电子分析天平:上海力辰邦西仪器科技有限公司;DH-600 恒温培养箱:北京科伟永兴仪器公司;H1750R 冷冻离心机:湖南湘仪离心机仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 葡萄皮酵素制备工艺

葡萄皮→清洗打浆→调整糖度→巴氏杀菌→接种混合发酵剂→发酵→过滤→酵素。

1.3.2 操作要点

1.3.2.1 原料处理

选择成熟且表皮无腐败的葡萄,去除葡萄梗与葡萄果肉,清洗并沥干水分,将收集的葡萄皮放入破壁机中进行破壁处理,得到葡萄皮浆料。

1.3.2.2 混合发酵菌种制备

酵母菌活化:取适量的酵母菌,按照 1:10(g/mL)的料液比加入 35℃的无菌水,混合均匀,于 30℃下培养至对数生长期,5 000 r/min 离心 5 min 得到湿菌体,待用。

植物乳杆菌活化:挑取植物乳杆菌单菌落,加入 MRS 肉汤培养基中于 37℃下进行扩大培养,至对数生长期时离心得到湿菌体,待用。

混合发酵菌种制备:将上述活化制备的酵母菌和植物乳杆菌湿菌体以质量比 1:1 混合,待用。

1.3.2.3 葡萄皮酵素制备

取一定量的葡萄皮浆料按照料液比 1:5(g/mL)与水混合,加入白砂糖调整糖度,加入一定量的混合菌种,发酵一定时间,过滤得到酵素成品。

1.3.3 酵素发酵工艺单因素试验

1.3.3.1 混合发酵菌种接种量的确定

确定白砂糖添加量 8%,发酵温度 30℃、发酵时间 36 h 的条件下,设置混合发酵菌种接种量为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%,发酵结束后测定酵素产品中 SOD 酶活力,其测定方法参照 SOD 试剂盒说明书进行。

1.3.3.2 白砂糖添加量的确定

确定混合发酵菌种接种量 0.6%、发酵温度 30℃、发酵时间为 36 h 的条件下,设置白砂糖添加量为 4%、6%、8%、10%、12%,发酵结束后测定酵素产品中 SOD 酶活力,其测定方法参照 SOD 试剂盒说明书进行。

1.3.3.3 发酵温度的确定

确定混合发酵菌种接种量 0.6%、白砂糖添加量 10%、发酵时间 36 h 的条件下,设置发酵温度为 25、30、35、40、45 °C,发酵结束后测定酵素产品中 SOD 酶活力,其测定方法参照 SOD 试剂盒说明书进行。

1.3.3.4 发酵时间的确定

确定混合发酵菌种接种量 0.6%、白砂糖添加量 10%、发酵温度 35 °C 的条件下,设置发酵时间为 12、24、36、48、60 h,发酵结束后测定酵素产品中 SOD 酶活力,其测定方法参照 SOD 试剂盒说明书进行。

1.3.4 酵素发酵工艺正交试验

在单因素试验的基础上,以混合发酵菌种接种量、白砂糖添加量、发酵时间、发酵温度为因素进行四因素三水平正交试验,因素与水平见表 1。

表 1 酵素发酵工艺条件优化正交试验因素与水平

水平	A 混合发酵菌种 接种量/%	B 白砂糖 添加量/%	C 发酵 温度/°C	D 发酵 时间/h
1	0.4	8	30	12
2	0.6	10	35	24
3	0.8	12	40	36

1.3.5 总黄酮含量测定

利用亚硝酸钠-硝酸铝法测定总黄酮含量。取 250 μL 不同浓度的芦丁标准品溶液或样品溶液,加入 75 μL 0.5% NaNO₂ 溶液混匀后,避光静置 5 min,再加入 150 μL 10% Al(NO₃)₃·6H₂O 溶液,混匀后,室温避光静置反应 5 min,最后加入 500 μL 1 mol/L NaOH 溶液混匀后,在 λ=510 nm 处测定反应液吸光度,根据不同芦丁标准品浓度与对应吸光度绘制标准曲线,计算样品总黄酮含量^[18]。

1.3.6 总酚含量的测定

参照 Cheng 等^[19]方法测定酵素中总酚含量。取 500 μL 样品与 250 μL 50% 福林酚试剂混合后,反应 5 min,再加入 500 μL 5% 碳酸钠溶液,避光反应 1 h,于 765 nm 处测定吸光度。以不同浓度没食子酸(gallic acid, GAE)标准溶液 x 为横坐标,以吸光度 y 为纵坐标作标准曲线,总酚含量以 mg 没食子酸/100 mL 表示。

1.3.7 DPPH 自由基清除率的测定

分别取 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0 mg/mL 发酵前后的酵素样品溶液 100 μL,分别加入 100 μL 0.1 mmol/L DPPH-无水乙醇溶液混匀,于暗处反应 30 min,在 517 nm 下测定吸光度 A_1 。对照组用无水乙醇代替 DPPH,测定其吸光度为 A_2 。以 V_c 作为阳性对照,空白组用蒸馏水代替酵素样品溶液,测定吸光度 A_0 。每个浓度重复测定 3 次,按照下式计算样品溶液对 DPPH 自由基清除率($X, %$)^[20]。

$$X = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100$$

1.3.8 ABTS⁺自由基清除率的测定

分别取 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0 mg/mL 发酵前后的酵素样品溶液 40 μL,分别加入 120 μL ABTS 工作液,充分混匀在室温下静置 6 min,于 734 nm 下测定吸光度 A_1 。对照组用无水乙醇代替 ABTS 工作液,测定其吸光度为 A_2 。以 V_c 作为阳性对照,空白组用蒸馏水代替酵素样品溶液,测定吸光度 A_0 。每个浓度重复测定 3 次,按照下式计算样品溶液对 ABTS⁺自由基清除率($Y, %$)^[21]。

$$Y = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100$$

1.4 数据处理

所有试验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。用 GraphPad Prism 9.0 软件作图并进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 酵素发酵单因素试验结果

2.1.1 混合发酵菌种接种量对酵素中 SOD 酶活力的影响

混合发酵菌种接种量对酵素中 SOD 酶活力的影响见图 1。

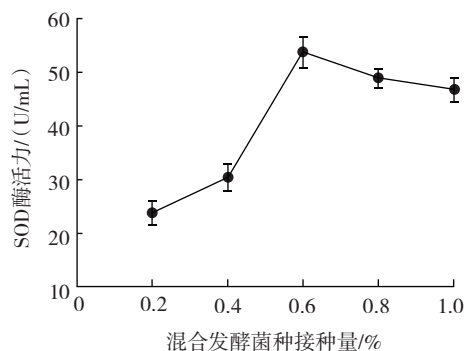


图 1 混合发酵菌种接种量对酵素中 SOD 酶活力的影响

Fig.1 Effect of mixed fermentation strains inoculation amount on SOD activity in grape skin enzyme

由图 1 可知,随着混合发酵菌种接种量的增加,酵素中 SOD 酶活力逐渐提高,当接种量为 0.6% 时,酵素中 SOD 酶活力最高,达到 53.80 U/mL,而随着接种量的进一步增加,酵素中的 SOD 酶活力呈现缓慢下降的趋势,这可能是由于菌种接种量过大时,菌体自身生长代谢过快,营养物质和氧气的消耗量提高,不利于后续的发醇。因此,选择混合发酵菌种接种量 0.4%、0.6%、0.8% 进行后续正交试验。

2.1.2 白砂糖添加量对酵素中 SOD 酶活力的影响

白砂糖添加量对酵素中 SOD 酶活力的影响见图 2。

由图 2 可知,不同白砂糖添加量对酵素中 SOD 酶活力有较大影响。随着白砂糖添加量的增加,酵素中

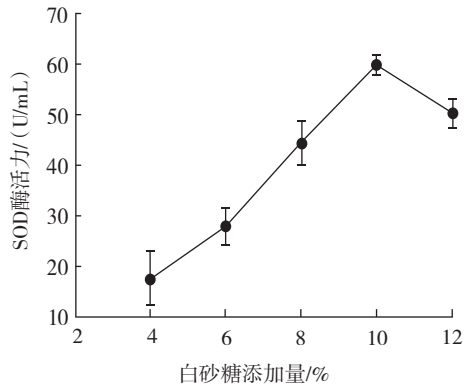


图2 白砂糖添加量对酵素中SOD酶活力的影响

Fig.2 Effect of sugar addition amount on SOD activity in grape skin enzyme

SOD酶活力呈现先上升后下降的趋势,这与蔡宁等^[6]研究的百香果皮酵素中糖含量对SOD酶活力影响的趋势一致。这是由于白砂糖添加量较低时,菌种能够利用的碳源不足,发酵速度缓慢,而白砂糖含量过高时,发酵液菌种所处的环境渗透压高,也不利于其生长。当白砂糖添加量为10%时,酵素中SOD酶活力最高,为59.85 U/mL。因此,选择白砂糖添加量8%、10%、12%进行后续正交试验。

2.1.3 发酵温度对酵素中SOD酶活力的影响

发酵温度对酵素中SOD酶活力的影响见图3。

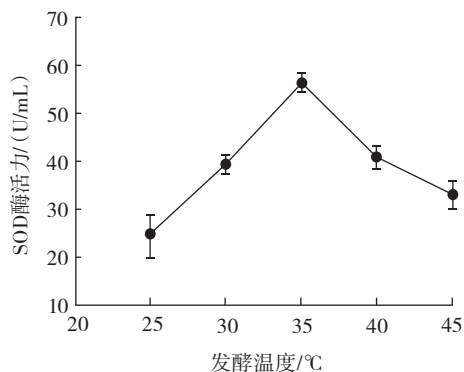


图3 发酵温度对酵素中SOD酶活力的影响

Fig.3 Effect of fermentation temperature on SOD activity in grape skin enzyme

由图3可知,随着发酵温度的升高,酵素中SOD酶活力呈现先升高后下降的趋势,这是由于发酵温度较低时,酵母菌和植物乳杆菌的代谢速率较慢,导致发酵不完全,而较高的温度又会抑制菌种的生长代谢以及发酵过程中相关酶的活性,从而导致SOD酶活力下降^[22]。在发酵温度为35°C时,酵素中SOD的酶活力最高,为56.90 U/mL,因此选择发酵温度30、35、40°C进行后续正交试验。

2.1.4 发酵时间对酵素中SOD酶活力的影响

发酵时间对酵素中SOD酶活力的影响见图4。

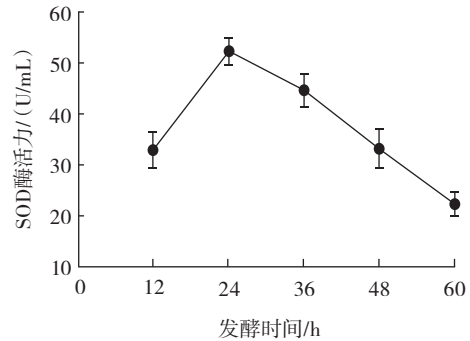


图4 发酵时间对酵素中SOD酶活力的影响

Fig.4 Effect of fermentation time on SOD activity in grape skin enzyme

由图4可知,随着发酵时间的延长,酵素中SOD酶活力呈现先上升后下降的趋势。这是由于开始阶段,基质中的营养成分充足,发酵时间的延长有助于菌种生长繁殖使得酵素中的SOD酶活力提高,而发酵时间过长会使基质中的营养成分逐渐被消耗从而导致微生物生长代谢以及发酵速度减慢,最终使酵素中的SOD酶活力下降^[23]。当发酵时间为24h时,酵素中的SOD酶活力最高为52.35 U/mL,因此,选择发酵时间12、24、36h进行后续正交试验。

2.2 酵素发酵正交优化试验结果

酵素发酵工艺优化正交试验结果与分析见表2。

表2 酵素发酵工艺优化正交试验结果与分析

Table 2 Results and analysis of orthogonal tests for enzyme fermentation process optimization

试验号	A	B	C	D	SOD酶活力/(U/mL)
1	1	1	1	1	48.24±0.47
2	1	2	2	2	53.41±1.14
3	1	3	3	3	51.27±1.05
4	2	1	2	3	60.25±0.98
5	2	2	3	1	45.13±1.04
6	2	3	1	2	55.62±0.91
7	3	1	3	2	40.65±1.22
8	3	2	1	3	43.57±1.45
9	3	3	2	1	47.81±0.93
k ₁	50.97	49.71	49.14	47.06	
k ₂	53.67	47.37	53.82	49.89	
k ₃	44.01	51.57	45.68	51.70	
R	9.66	4.20	8.14	4.64	

由表2可知,4个因素对酵素中SOD酶活力影响的主次顺序为A>C>D>B,即混合发酵菌种接种量>发酵温度>发酵时间>白砂糖添加量。最优发酵工艺参数为A₂B₃C₂D₃,即混合发酵菌种接种量0.6%、白砂糖添加量12%、发酵温度35°C、发酵时间36h。

发酵工艺优化正交试验方差分析结果见表3。

表3 正交试验方差分析

Table 3 Analysis of variance for orthogonal tests

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
A	446.980	2	223.490	201.552	<0.001
B	79.614	2	39.807	35.900	<0.001
C	300.401	2	150.200	135.457	<0.001
D	98.335	2	49.168	44.341	<0.001
误差	19.959	18	1.109		

注: $P < 0.01$ 表示影响极显著。

由表3可知,混合发酵菌种接种量、白砂糖添加量、发酵温度、发酵时间均对SOD酶活力有极显著影响($P < 0.01$)。为验证正交优化工艺条件,在混合发酵菌种接种量0.6%、白砂糖添加量12%、发酵温度35℃、发酵时间36h的条件下进行验证试验,发酵得到的酵素中SOD酶活力为(62.34±0.67)U/mL,结果可靠。

2.3 酵素中总黄酮含量和多酚含量测定结果

在混合发酵菌种接种量0.6%、白砂糖添加量12%、发酵温度35℃、发酵时间36h条件下进行发酵制得酵素,分别测定发酵前后葡萄皮基质中总黄酮和总酚含量。其中芦丁标准曲线回归方程为 $y = 0.0009x + 0.2023$,相关系数 R^2 为0.9956,没食子酸标准曲线回归方程为 $Y = 0.0011X + 0.1396$, $R^2 = 0.9955$,线性均较好。测得发酵前后基质中总酚和总黄酮含量见表4。

表4 发酵前后基质中总多酚和总黄酮含量

Table 4 Total polyphenols and flavonoids contents in substrate before and after fermentation

样品	总酚含量/ (mg 没食子酸 / 100 mL)	总黄酮含量/ (mg 芦丁 / 100 mL)
发酵前	132.41±4.25	75.23±1.36
发酵后	205.62±5.18	96.47±1.21

由表4可知,发酵后酵素中的总酚含量明显增加,增加量为55.29%。有研究表明植物乳杆菌在发酵过程中会去除与酚类化合物结合的糖类等成分,使细胞壁中的结合态酚类化合物游离出来,从而导致总酚含量增加^[24]。此外,发酵前后酵素基质中总黄酮含量也明显提高,增加量为28.23%,此结果与段晓宇等^[11]研究结果一致。

2.4 酵素对DPPH自由基清除率的影响

基于发酵后酵素中总酚与总黄酮含量均明显提高,进一步测定了酵素发酵前后对DPPH自由基的清除率,结果见图5。

由图5可知,相同浓度下,发酵前后酵素对DPPH自由基清除率均小于阳性对照 V_c ,其中发酵后酵素对DPPH自由基清除率均明显高于发酵前样品,在浓度为10.0 mg/mL时,发酵前样品对DPPH自由基清除率

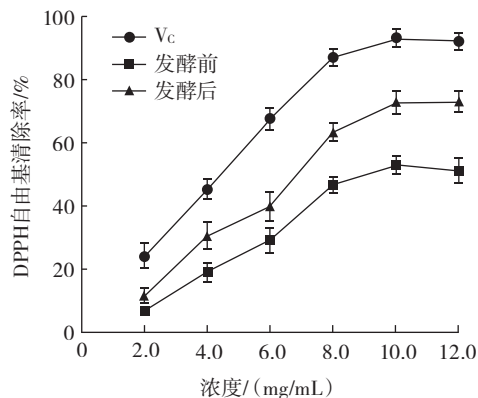


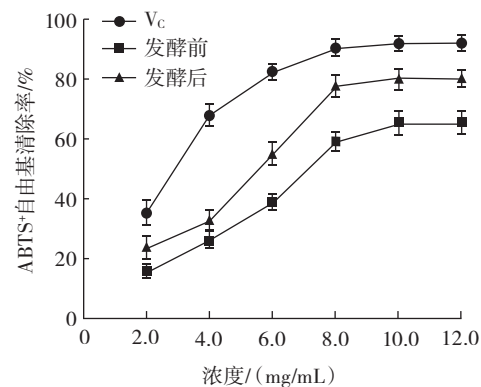
图5 酵素样品对DPPH自由基的清除率的影响

Fig.5 Effect of enzyme samples on the DPPH radical scavenging rate

为53.35%,发酵后样品对DPPH自由基清除率为73.15%,表明发酵有助于提高酵素对DPPH自由基的清除率,此结果与王思溥等^[25]研究结果一致。

2.5 酵素对ABTS⁺自由基的清除率

测定酵素发酵前后对ABTS⁺自由基的清除率,结果见图6。

图6 酵素样品对ABTS⁺自由基清除率的影响Fig.6 Effect of enzyme samples on ABTS⁺ radical scavenging rate

由图6可知,相同浓度下,发酵前后酵素对ABTS⁺自由基的清除率均小于阳性对照 V_c ,其中发酵后酵素对ABTS⁺自由基清除率均明显高于发酵前样品,在浓度为8.0 mg/mL时,发酵前样品对ABTS⁺自由基清除率为59.25%,发酵后样品的ABTS⁺自由基清除率为77.85%,其对ABTS⁺自由基清除率提高了18.60%,表明发酵有助于提高酵素对ABTS⁺自由基的清除率。该结果与李江等^[26]研究结果一致,其结果表明发酵后霍山石斛酵素对ABTS⁺自由基清除率提高了31.1%,出现该结果的原因与酵素中增加的总酚、总黄酮以及SOD酶活力有关。

3 结论

通过单因素和正交试验,确定葡萄皮酵素最佳发

酵工艺条件为酵母菌、植物乳杆菌混合发酵菌种接种量 0.6%、白砂糖添加量 12%、发酵温度 35 ℃、发酵时间 36 h,在此条件下发酵得到的酵素中 SOD 酶活力为 (62.34±0.67)U/mL。与未发酵相比,发酵后酵素中的总酚含量和总黄酮含量明显增加,增加量分别为 55.29%、28.23%。此外,葡萄皮酵素在一定的浓度下表现较好的抗氧化活性,并呈现浓度依赖效应,其对 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的清除率相比发酵前均明显提高,表明发酵有助于提高葡萄皮酵素的抗氧化能力。本研究对葡萄皮副产物的深加工与利用具有重要的指导意义,对葡萄产业的可持续发展提供参考。后续将在此研究的基础上,深入探究葡萄皮在制备酵素过程中主要酚类物质含量和种类的变化规律,为进一步阐明葡萄皮酵素抗氧化作用的物质基础和分子机制提供理论依据。

参考文献:

- [1] 高昕瑜,刘峰,董书含,等.葡萄酵素的制作工艺以及功效的研究进展[J].食品安全导刊,2022(23):119-121.
GAO Xinyu, LIU Feng, DONG Shuhan, et al. Research progress on the production technology and efficacy of grape enzyme[J]. China Food Safety Magazine, 2022(23): 119-121.
- [2] 陈洁梅,缪冰旋,张灿辉,等.野生葡萄及葡萄酒抗氧化活性和抗菌性研究[J].广西植物,2014,34(4):510-514,499.
CHEN Jiemei, MIAO Bingxuan, ZHANG Canhui, et al. Antioxidant activity and antibacterial property of wild grape and grape wine[J]. Guihaia, 2014, 34(4): 510-514, 499.
- [3] OLIVEIRA J, DA SILVA M A, TEIXEIRA N, et al. Screening of anthocyanins and anthocyanin-derived pigments in red wine grape pomace using LC-DAD/MS and MALDI-TOF techniques[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(35): 7636-7644.
- [4] SPARROW A M, DAMBERGS R G, CLOSE D C. Grape skins as supplements for color development in Pinot noir wine[J]. Food Research International, 2020, 133: 108707.
- [5] SASAKI K, GERIBALDI-DOLDAN N, SZELE F G, et al. Grape skin extract modulates neuronal stem cell proliferation and improves spatial learning in senescence-accelerated prone 8 mice[J]. Aging, 2021, 13(14): 18131-18149.
- [6] 陈雅纯,韩玮钰,张拓,等.葡萄多酚类物质研究进展[J].农产品加工,2019(19):83-86.
CHEN Yachun, HAN Weiyu, ZHANG Tuo, et al. Research progress on grape polyphenol[J]. Farm Products Processing, 2019(19): 83-86.
- [7] 李婉平,吕晓彤,李若兰,等.新疆赤霞珠葡萄皮渣中多酚类物质质量分数及其复合抗氧化剂研究[J].西北农业学报,2018,27(2):228-237.
LI Wanping, LÜ Xiaotong, LI Ruolan, et al. Study on phenolics mass fraction and compound antioxidants of cabernet sauvignon grape residue[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(2): 228-237.
- [8] 聂小伟,何粉霞,毕可海,等.酿酒葡萄皮渣多酚开发利用现状研究[J].农产品加工,2020(2):74-75,78.
NIE Xiaowei, HE Fenxia, BI Kehai, et al. Study on the development and utilization of polyphenols in grape skins[J]. Farm Products Processing, 2020(2): 74-75, 78.
- [9] CHEN Y, WEN J Y, DENG Z X, et al. Effective utilization of food wastes: Bioactivity of grape seed extraction and its application in food industry[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 73: 104113.
- [10] 唐超,江惠娟,苏二正.食用酵素的研究进展[J].生物加工过程,2018,16(3):84-90.
TANG Chao, JIANG Huijuan, SU Erzhen. Research progress of edible Jiaosu[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2018, 16(3): 84-90.
- [11] 段晓宇,曾莉,樊睿,等.草莓菠萝复合酵素成分及其体外生物活性研究[J].天然产物研究与开发,2021,33(10):1635-1642,1706.
DUAN Xiaoyu, ZENG Li, FAN Rui, et al. Study on constituents of strawberry-pineapple complex Jiaosu and its bioactivity *in vitro*[J]. Natural Product Research and Development, 2021, 33(10): 1635-1642, 1706.
- [12] 陈秋慧,魏建敏,涂青,等.刺梨原汁酵素发酵工艺优化及品质分析[J].中国酿造,2023,42(4):196-202.
CHEN Qiuhui, WEI Jianmin, TU Qing, et al. Optimization of fermentation technology for *Rosa roxburghii* juice Jiaosu and its quality analysis[J]. China Brewing, 2023, 42(4): 196-202.
- [13] 赵菲,佟长青,李伟,等.羊栖菜酵素对小鼠肠道菌群结构和粪便差异代谢物的影响[J].大连海洋大学学报,2021,36(5):767-774.
ZHAO Fei, TONG Changqing, LI Wei, et al. Effects of fermented seaweed *Sargassum fusiforme* on microflora structure in intestinal and fecal differential metabolites in mice[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(5): 767-774.
- [14] 李亚辉,马艳弘,张宏志,等.山药果蔬在乳酸菌发酵过程中组分及生物活性变化[J].食品科学,2017,38(10):137-142.
LI Yahui, MA Yanhong, ZHANG Hongzhi, et al. Variations in composition and bioactivities during fermentation of a mixture of Chinese yam, apple and tomato by lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2017, 38(10): 137-142.
- [15] LI Y Y, LIU H, QI H W, et al. Probiotic fermentation of *Ganoderma lucidum* fruiting body extracts promoted its immunostimulatory activity in mice with dexamethasone-induced immunosuppression[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 141: 111909.
- [16] 蔡宁,于傲,佟永清.百香果皮酵素饮料研制及对运动耐力的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(10):230-236.
CAI Ning, YU Ao, TONG Yongqing. Research on ferment beverage of *Passiflora edulis* peel and its effect on exercise endurance[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 230-236.
- [17] 黄慧雯,周志乾,陈文帅,等.凤梨果皮酵素制作工艺优化及特性分析[J].广州化工,2022,50(4):75-79.
HUANG Huiwen, ZHOU Zhiqian, CHEN Wenshuai, et al. Production technology and characteristic analysis of pineapple pericarp enzyme[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(4): 75-79.
- [18] 缪园欣,廖明星,孙爱红,等.超声-乙醇法提取铁皮石斛花总黄酮及其体外抗氧化性的研究[J].中国酿造,2019,38(4):155-159.
MIAO Yuanxin, LIAO Mingxing, SUN Aihong, et al. Extraction of total flavonoids from *Dendrobium officinale* flowers by ultrasonic-ethanol synergistic and its antioxidant activity[J]. China Brewing, 2019, 38(4): 155-159.
- [19] CHENG Y X, WU T, CHU X Q, et al. Fermented blueberry pomace with antioxidant properties improves fecal microbiota community structure and short chain fatty acids production in an *in vitro* mode[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109260.
- [20] 夏宁,谢春阳,黄威,等.响应面法优化花生红衣原花青素提取工艺及抗氧化活性[J].食品研究与开发,2023,44(20):98-106.
XIA Ning, XIE Chunyang, HUANG Wei, et al. Procyanidins in pea-

- nut red coat: Optimization of extraction process by response surface methodology and antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2023, 44(20): 98-106.
- [21] 宁楚洁, 赵倩, 谢春阳, 等. 玉米须果蔬复合酵素饮料的研制及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(20): 116-122.
NING Chujie, ZHAO Qian, XIE Chunyang, et al. Extraction of functional components from corn stigma and preparation of corn stigma, fruit and vegetable complex enzyme beverage[J]. Food Research and Development, 2019, 40(20): 116-122.
- [22] 战伟伟, 魏晓宇, 高本杰, 等. 蓝锭果椰子复合酵素发酵工艺优化[J]. 中国酿造, 2017, 36(1): 191-195.
ZHAN Weiwei, WEI Xiaoyu, GAO Benjie, et al. Optimization of fermentation process of *Lonicera caerulea* and coconut compound enzyme[J]. China Brewing, 2017, 36(1): 191-195.
- [23] 杨婧娟, 张希, 谭书宇, 等. 黄精发酵工艺的初步研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(17): 81-88.
YANG Jingjuan, ZHANG Xi, TAN Shuyu, et al. A preliminary research of fermentation conditions of rhizoma polygonati[J]. Food Research and Development, 2016, 37(17): 81-88.
- [24] BENINCASA C, MUCCILLI S, AMENTA M, et al. Phenolic trend and hygienic quality of green table olives fermented with *Lactobacillus plantarum* starter culture[J]. Food Chemistry, 2015, 186: 271-276.
- [25] 王思溥, 朱丹, 牛广财, 等. 黑果腺肋花楸酵素自然发酵过程中主要成分与抗氧化活性变化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(15): 93-100.
WANG Sipu, ZHU Dan, NIU Guangcai, et al. Changes of main components and antioxidant activity of black chokeberry jiaosu in natural fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 93-100.
- [26] 李江, 顾逸菲, 王珍珍, 等. 霍山石斛酵素发酵过程中抗氧化性能的变化[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 80-89.
LI Jiang, GU Yifei, WANG Zhenzhen, et al. The changes of antioxidant activity of *Dendrobium huoshanense* jiaosu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(3): 80-89.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2023-11-08