西兰花酵素在发酵过程中生化指标变化及其抗氧化活性研究

韦仕静[1]，刘涛[1]，葛亚中[2]，任杰[3]，余庆涛[2]，杨继国[1,3]，宁正祥[1]
（1.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）（2.无限极（中国）有限公司，广东广州 510665）
（3.华南协同创新研究院，广东东莞 523808）

摘要：以西兰花作为发酵原料，通过加入酵母菌、乳酸菌、醋酸杆菌复合发酵，研究西兰花酵素发酵过程中生化指标以及抗氧化性变化。其中，以 pH 值、菌落总数、总糖、乙醇、乳酸和乙酸作为生化指标考察西兰花酵素发酵过程中的变化；通过测定总酚、DPPH 自由基清除率、超氧化物歧化酶（SOD）、氧自由基吸收能力（ORAC）作为抗氧化性变化指标。研究表明：在发酵过程中，pH 值不断降低，由最初的 4.49±0.02 降低到 3.51±0.03；菌落总数在第 3 d 最高，为 9.03(±0.45)×10^7 CFU/mL；总糖被微生物利用消耗，由 213.20±0.12 mg/mL 降低到 79.24±0.07 mg/mL；最终乙醇、乳酸和乙酸含量分别为 28.23±0.06 mg/mL、7.89±0.05 mg/mL 和 11.66±0.05 mg/mL；而抗氧化性指标总酚、DPPH 自由基清除率、SOD 和 ORAC 在前 7 d 处于上升趋势，7 d 后趋于稳定。其中，DPPH 自由基清除率、ORAC 与总酚有正相关性（p<0.01）。相对于实验室自制桑葚酵素，DPPH 自由基清除率较高，抗氧化性较好。

关键词：西兰花酵素；生化指标；抗氧化性
文章篇号：1673-9078(2017)8-123-129 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.019

Study on Changes in the Biochemical Indicators and Antioxidant Activity of Broccoli Enzyme during Fermentation

WEI Shi-jing[1], LIU Tao[1], GE Ya-zhong[2], REN Jie[3], YU Qing-tao[2], YANG Ji-guo[1,3], NING Zheng-xiang[1]
(1.College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.Infinitus (China) Company Ltd, Guangzhou, 510665, China) (3.South China Institute of Collaborative Innovation, Dongguan 523808, China)

Abstract: Broccoli was used as the raw material for fermentation, and yeast, lactic acid bacteria, and acetic acid bacteria were added to carry out mixed fermentation to study the changes of biochemical indicators and antioxidant activity in broccoli Jiaosu during fermentation. In this study, the changes of biochemical indicators were investigated by monitoring the changes in the pH value, total number of colonies, total amounts of carbohydrate, ethanol, lactic acid, and acetic acid. Further, the antioxidant activity was studied by measuring the total phenol, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging rate, superoxide dismutase (SOD) activity, and oxygen radical absorbance capacity (ORAC). The results showed that during fermentation, the pH value decreased constantly from the original 4.49±0.02 to 3.51±0.03. The highest total number of colonies was observed on the third day, which was 9.03(±0.45)×10^7 CFU/mL. Carbohydrate present in the medium was consumed by the microbes resulting in the reduction of its total concentration from 213.20±0.12 mg/mL to 79.24±0.07 mg/mL. Finally, the contents of ethanol, lactic acid, and acetic acid were 28.23±0.06 mg/mL, 7.89±0.05 mg/mL, and 11.66±0.05 mg/mL, respectively. The total phenolic content, DPPH radical scavenging ability, SOD activity, and ORAC showed an increasing trend during the first seven days and tended to remain stable after day seven. The total phenolic content showed positive correlations with DPPH radical scavenging rate and ORAC (p<0.01). Compared with the mulberry enzyme prepared by the laboratory, broccoli enzyme had a higher DPPH radical scavenging rate and better antioxidant activity.

Key words: broccoli jiaosu; biochemical indicators; antioxidant activity

收稿日期：2017-02-26
基金项目：十二五科技支撑计划子课题（2012BAD33B11）
作者简介：韦仕静（1992-），女，硕士研究生，研究方向：食品科学
通讯作者：杨继国（1977-），男，博士，副研究员，研究方向：食品生物化

酵素食品是指使用酵母、乳酸菌和醋酸菌等益生菌发酵果蔬及可食性药材而得到的固体或者液体食品，富含大量的脂肪酶、淀粉酶、超氧化物歧化酶、乳酸、乙酸及少量乙醇等代谢产物，具有促进人体新陈代谢、调节人体肠道与抗氧化等功效[1]。“酵素”一词源于日本，据估测，现今日本酵素一年 1000 亿日元以上的市场量，而台湾酵素与食醋一年市场值约 20 亿元，在亚洲具有很大的市场开发前景。近年来，随着经济不断发展，生活水平日益提高，越来越多的人开始注重养生。据世界卫生组织最近预测，全球 75%的人处于亚健康状态，促使保健品在全球市场占据重要地位[2-4]。随着酵素在海外火热，国内企业及专业人士开始研究开发酵素产品，但国内尚未有系统的监督管理办法，导致酵素产品参差不齐，产品质量相差很大。随着酵素产品不断推广、消费者对养生注重及相关政府部门加强管理，酵素产品在我国将迅速发展[5,6]。

西兰花，又名花椰菜。根据日本一项研究表明：西兰花的营养价值及防病功效高于其他蔬菜，名列第一[7,8]。西兰花营养成分含量高且营养物质全面，主要包括蛋白质、碳水化合物、脂肪、矿物质、胡萝卜素、维生素 C 和维生素 A 等，其中维生素 A 含量是白菜花的 240 倍，是番茄的 6 倍。对心血管和高血压有调节和预防的功效，在防癌抗癌上具有显著作用[9,10]。

现今国内文献尚未有西兰花作为酵素原料的文章报道。本研究利用酵母、乳酸菌和醋酸杆菌复合发酵，通过辅助添加浓缩苹果汁作为糖原，经过 1 个月左右发酵，得到发酵初品。在发酵过程中，检测其生理生化指标的变化以及总酚、DPPH 自由基清除率等抗氧化性指标的变化，以期探索西兰花酵素在发酵过程中的变化情况，进一步研究西兰花酵素的营养价值以及市场前景[11,12]。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

西兰花（市售）；酵母菌为梅山活性干酵母；浓缩苹果汁（含糖量：706.89 mg/mL），为无限极（中国）有限公司提供；嗜酸乳酸菌、干酪乳杆菌、醋酸杆菌（沪酿 1.01），广东省微生物菌种保藏中心；葡萄糖、果糖、乙醇、乙酸和乳酸为色谱纯；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼、水溶性维生素 E(Trolox)、2,2-偶氮二(2-甲基丙基咪)二盐酸盐（AAPH）、荧光素（Fluorescein）、无水乙醇、碳酸钠和福林-酚试剂等均为分析纯试剂。

生化培养箱，上海博迅实业有限公司医疗设备厂；Thermo U3000 高效液相色谱仪；SW-CJ-10 型单人净化工作台，苏州净化设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 西兰花酵素的制备

西兰花洗净沥干，切碎（<1 cm^3），将西兰花:冷开水:浓缩苹果汁按照 6:2:2 的质量比加入灭菌的玻璃坛中，拌匀后，加入质量比为 0.01%酵母以及 0.1%的乳酸菌（嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌各 1/2），密封发酵，搅拌次数为每天 3 次，1 min/次；第 5 d，加入质量比为 1%已扩培的醋酸杆菌，后 5 d，每天搅拌 1 次，1 min/次。后期密封发酵，1 个月后制得西兰花酵素初液。发酵温度：30.0±1.0 ℃。

1.2.2 菌落总数测定

参照 GB 4789.2-2010 进行检测[13]。

1.2.3 pH 测定

由酸度计直接进行测定。

1.2.4 葡萄糖、果糖、乙醇、乳酸及乙酸测定

参照文献[14]进行测定。

色谱分离条件：

色谱柱：Aminex HPX-87H 有机酸分析柱（300 mm×7.8 mm;Bio-Rad.Hercules），流动相：0.005 mol/L H_2SO_4 溶液，流速 0.6 mL/min，柱温 50 ℃。检测器参数（双通道检测）：紫外检测器波长 210 nm，示差折光检测器温度 50 ℃。

样品处理：取西兰花酵素发酵液稀释成相应倍数，过 0.22 μm 膜过滤，进样 10 μL。

标准品处理：精确称取标准品，稀释为不同浓度，使用 0.22 μm 膜过滤进样，进样量 20 μL。

1.2.5 总酚的测定

1.2.5.1 标准曲线的制作

精密吸取没食子酸标准溶液 0.0 mL、0.2 mL、0.4 mL、0.6 mL、0.8 mL 和 1.0 mL 于 6 个 10 mL 的容量瓶中，加入 2.5 mL 福林-酚试剂，摇匀，在 5 min 后加入 2 mL 的 15%碳酸钠溶液，用蒸馏水定容至 10 mL，室温下反应 2 h，在 760 nm 波长下测定相应的吸光度。总酚含量以没食子酸等价物来表述，通过没食子酸标曲回归方程计算。其中，没食子酸标准溶液浓度分别为 0 μg/mL、2 μg/mL、4 μg/mL、6 μg/mL、8 μg/mL 和 10 μg/mL。

1.2.5.2 发酵液吸光值的测定

分别取西兰花酵素发酵液 100 μL 于 10 mL 容量瓶内，加入 2.5 mL 福林-酚试剂，摇匀，在 5 min 后加入 2 mL 的 15%碳酸钠溶液，用蒸馏水定容至 10 mL，室温下反应 2 h 后，在 760 nm 波长下测定相应

的吸光值。

1.2.6 DPPH 自由基清除能力

样品处理：样品经 200 目纱布过滤，稀释 30 倍，取滤液待用。

测定方法：在0.02 mg/mL的DPPH-乙醇溶液2 mL中加入样品2 mL，混合均匀，25 ℃恒温水浴室30 min，测定其在 517 nm 处的吸光度值。空白组以 2 mL 无水乙醇代替试样。同一测定重复 3 次。

DPPH 清除率%=[1-(A_1-A_2)/A_0]×100%

式中：A_1 为样品溶液的吸光度；A_2 为用无水乙醇代替 DPPH 时测得对应浓度的本底吸光度；A_0 为空白组的吸光度。

1.2.7 超氧化物歧化酶（SOD）酶活测定

1.2.7.1 邻苯三酚自氧化速率的测定

参考文献[15]中邻苯三酚自氧化常量法进行测定，取 4.5 mL、0.1 mol/L tris-HCl 缓冲液于试管中，加入 4.2 mL 去离子水，25 ℃预热 20 min，加入经 25 ℃预热的邻苯三酚 0.3 mL（空白管用 10 mmol/L HCl 溶液代替），迅速混合均匀并计时，倒入比色皿中，以空白管为参比，在 320 nm 波长下，自反应 30 s 开始，每隔 30 s 计一次吸光值，测定时间为 4 min。

1.2.7.2 样品活性的测定

取 4.5 mL、0.1 mol/L tris-HCl 缓冲液于试管中，加入 3.9 mL 去离子水和 0.3 mL 发酵液，25 ℃预热 20 min，加入经 25 ℃预热的邻苯三酚 0.3 mL（空白管用 10 mmol/L HCl 溶液代替），迅速混合均匀并计时，倒入比色皿中，以空白管为参比，在 320 nm 波长下，自反应 30 s 开始，每隔 30 s 计一次吸光值，测定时间为 4 min。

酶活力(U)=[(A-B)/A]/50%×反应总体积×(样品稀释倍数/样液体积)

式中：A 为邻苯三酚自氧化速率；B 为发酵液抑制邻苯三酚自氧化速率。SOD 酶活力定义：在 1 mL 反应液中，每分钟抑制邻苯三酚自氧化速率达到 50%的酶量定义为一个活力单位。

1.2.8 氧自由基清除能力（ORAC）的测定

参考文献[16]中的测定方法：

(1)设置酶标仪参数；

(2)按照图 1 对应的孔分别加 20 μL 样品、不同浓度 Trolox 标准液（6.25 μM、12.5 μM、25 μM、50 μM）、pH 7.4 磷酸缓冲溶液工作液（F 孔加 40 μL 磷酸缓冲溶液工作液），在 37 ℃下孵育 10 min；

(3)在每个孔中加 200 μL Fluoroscein 工作液，孵育至少 20 min；

(4)除了 F 孔，向每个孔加 20 μL AAPH 溶液；

(5)加入 119.4 μmol/mL AAPH 后立即放入酶标仪。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	F	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B	B	T1	T2	T3	T4	B	S1	S2	S3	S4	S5	B
C	B	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	B
D	B	S13	S14	S15	T1	T2	T3	T4	B	S1	S2	B
E	B	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	B
F	B	S15	S14	S13	S12	S11	S10	S9	S8	S7	S6	B
G	B	S5	S4	S3	S2	S1	B	T4	T3	T2	T1	B
H	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

图 1 96 孔板参数设置

Fig.1 Parameter settings for the 96-well plate

注：F=200 μL Fluoroscein 工作液+40 μL 磷酸缓冲溶液工作液；B=空白；T=Trolox；S=样品。

酶标仪参数，激发波长：485 nm；发射波长：538 nm；振动模型：轨道振动震动幅度：4 mm；震动时间：8 s。

1.2.9 数据分析

采用 Origin 8.5 和 SPSS 19.0 对本文数据进行处理和分析，每组重复 3 次，实验数据表示为平均值±标准偏差；使用 Pearson 法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 西兰花酵素在发酵过程中 pH 变化

使用酸度计对西兰花发酵液的 pH 值进行测定，测定结果如图 2 所示.

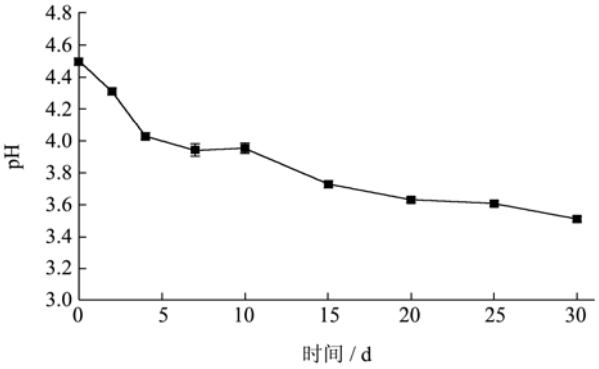


图 2 发酵过程中 pH 变化

Fig.2 Changes in pH value during fermentation

由图 2 可知，初试发酵液 pH 值为 4.49±0.02，随着发酵时间延长，pH 值不断下降，30 d 后为 3.51±0.03。发酵过程中，前 5 d 主要产醇及乳酸[17]，酵母在发酵过程中利用糖原在厌氧条件下产生乙醇及二氧化碳，二氧化碳一部分溶于发酵液，与乳酸共同作用，降低发酵液中的 pH 值。醋酸杆菌利用乙醇生成乙酸及其他有机酸，随着醋酸杆菌的加入，使发酵过程中 pH 值不断降低。

2.2 西兰花酵素在发酵过程中菌落总数变化

根据发酵过程中菌落总数变化，能够直观了解微生物在发酵液中的生长情况，西兰花酵素发酵过程中菌落总数变化情况如图 3 所示。

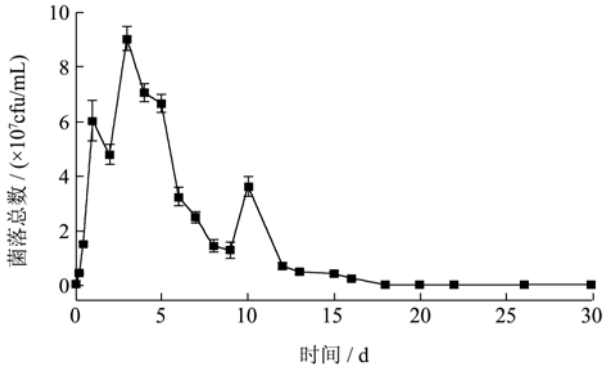


图 3 发酵过程中菌落总数变化

Fig.3 Changes in the total number of colonies during fermentation

在发酵过程中微生物利用西兰花及浓缩苹果汁生长代谢，由图 3 可以看出前期的酵母和乳酸菌生长快速，于第 3 d 达到最大值，为 9.03(±0.45)×10^7 CFU/mL。随着发酵液中物质的不断消耗，微生物生长缓慢并不断下降，第 5 d 加入醋酸杆菌，由于醋酸杆菌为好氧性微生物，实验中对加入醋酸杆菌后发酵液的搅拌次数较少，导致生长缓慢，在第 10 d 生长达到最大，为 3.62×10^7 CFU/mL，主要为发酵液中部分营养物质前期被酵母和乳酸菌利用，导致后期微生物生长所需营养物质有限，生长情况较前期差，30 d 后菌落总数为 0.01(±0.003)×10^7 CFU/mL。结合图 2 发酵过程中 pH 值的变化，pH 值不断降低，在一定程度上能够抑制微生物的生长。

2.3 西兰花酵素在发酵过程中总糖、乙醇、乳酸及乙酸变化

表 1 葡萄糖、果糖、乙醇、乳酸和乙酸的保留时间及线性关系

Table 1 Linear relationship of glucose, fructose, ethanol, lactic acid, and acetic acid with retention time

组分	保留时间/min	线性关系	R^2
葡萄糖	9.035	y=12242x-1907.5	0.9991
果糖	9.795	y=12414x-3068.7	0.9999
乙醇	21.632	y=3521.9x+828.75	0.9995
乳酸	12.486	y=1112.3x-54.278	0.9999
乙酸	14.909	y=58599x-3585.7	0.9998

发酵过程中添加的糖原为浓缩苹果汁，主要为葡萄糖与果糖。实验中，以葡萄糖与果糖之和表示西兰花发酵液中的总糖消耗情况。通过高效液相色谱法测定葡萄糖、果糖、乙醇、乳酸和乙酸含量变化。具体的保留时间及线性关系如表 1 所示。

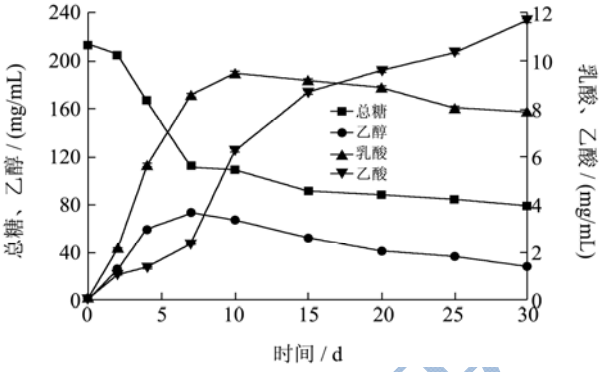


图 4 发酵过程中总糖、乙醇、乳酸和乙酸变化

Fig.4 Changes in the total amounts of sugar, ethanol, lactic acid, and acetic acid during fermentation

由图 4 所示，为西兰花酵素发酵过程中总糖、乙醇、乳酸和乙酸变化情况。其中，总糖由 213.20±0.12 mg/mL 降低到 79.24±0.07 mg/mL，前 7 d 下降速度最快。乙醇在发酵过程中先增加后降低，于第 7 d 达到最大值 73.46±0.05 mg/mL，最终为 28.23±0.06 mg/mL。前 7 d，乳酸菌利用糖原转化为乳酸，乳酸含量不断升高，后期小幅度下降，最终含量为 7.89±0.05 mg/mL。醋酸杆菌于发酵第 5 d 加入，其主要利用乙醇产乙酸，因此，在 5 d 后乙酸含量上升明显，最终为 11.66±0.05 mg/mL。西兰花酵素发酵过程中，糖原主要被酵母和乳酸菌消耗，醋酸杆菌主要利用乙醇进行代谢，因此糖在前期消耗快，后期平缓减低。结合图 2，乳酸和乙酸的增加导致了发酵液 pH 值不断降低。

2.4 西兰花酵素在发酵过程中总酚变化

总酚是指所有酚类物质，包括多酚和单酚。是绝大多数具有抗氧化活性物质的总称，通过测定总酚含量，可判断出抗氧化性的变化趋势。如图 5 所示，为西兰花酵素发酵过程中的总酚变化。

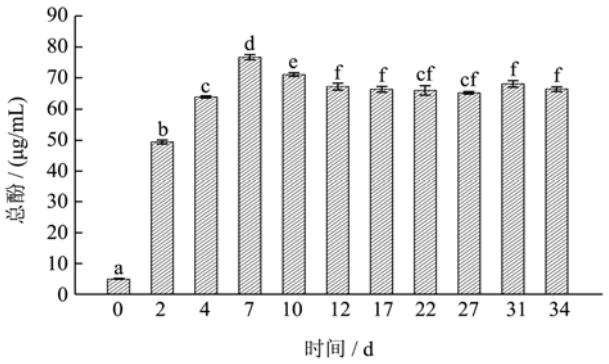


图 5 发酵过程中总酚的变化

Fig.5 Changes in total phenolics during fermentation

注：图中“a、b、c、d、e 和 f”不同的字母表示显著性差异（p<0.05）；相同的字母表示没有显著性差异（p>0.05）。

如图 5 所示，西兰花在发酵过程中总酚含量在前 7 d 上升，7 d 后稍有下降，后期基本保持平稳状态。西兰花发酵采用固液混合发酵，随着发酵的进行，西兰花中的成分不断溶出，导致总酚含量在前 7 d 上升迅速；随着微生物的生长利用，酵母在有氧的条件下利用糖原生成水和二氧化碳，发酵液中水的增加会稀释发酵液中成分浓度，总酚含量小幅度降低，34 d 后为 66.31±0.64 μg/mL。

2.5 西兰花酵素在发酵过程中 DPPH 自由基清除率变化

按实验方法 1.2.6 测定，西兰花酵素发酵过程中 DPPH 自由基清除率结果如图 6 所示：

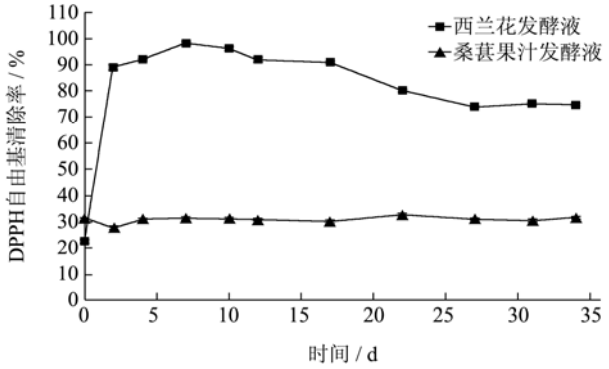


图 6 发酵过程中 DPPH 自由基清除率变化

Fig.6 Changes in DPPH radical scavenging rate during fermentation

如图 6 所示，西兰花发酵液样品处理稀释 30 倍，在发酵过程中 DPPH 自由基清除率于 7 d 增加到最高，为 98.41±0.61%，7 d 后缓慢降低，34 d 为 74.49±0.50%。对比实验室自制桑葚果汁发酵液(样品稀释 30 倍)，一个月后 DPPH 自由基清除率为 31.74±0.44%。相比而言，西兰花酵素初液 DPPH 自由基清除率较高，抗氧化性较好。Fessenden 等[19]认为酚类物质能给出一个氢离子并通过共振杂化而稳定，影响自由基清除率。结合图 5 中总酚含量的变化趋势图，DPPH 自由基清除率变化趋势与总酚含量变化呈一定的相关性。

2.6 西兰花酵素在发酵过程中 SOD 酶活变化

超氧阴离子是人体生成的主要超氧化物，对人体的危害最大。而 SOD 能够特异性消除超氧阴离子。因此本部分试验以 SOD 酶活作为检测对象，分析发酵过程中 SOD 酶活变化情况。结果如图 7 所示。

如图 7，发酵过程中西兰花 SOD 酶活变化在 4~7 d 时达到最高，为 73.32±0.55 U/mL。随着发酵的进行，SOD 酶活不断下降，后期趋于平稳，34 d 后为 23.68±0.45 U/mL。SOD 是一种重要的抗氧化剂，保护暴露于氧气中的细胞，因其受温度和 pH 值等影响，具有不稳定性。在发酵过程中，前期不断搅拌，西兰花内溶物不断溶出，微生物快速生长代谢，SOD 值迅速增加；天然的 SOD 主要分为三类，为 Cu.Zn-SOD、Mn.SOD 和 Fe-SOD，其中 Cu.Zn-SOD 为最常见的一种，呈绿色，主要存在机体细胞浆中。文献[20]分析了超氧化物歧化酶受 pH 值的影响情况，Cu.Zn-SOD 在 pH 为 3.6 时就会有 90%的 Zn 脱落，且 SOD 在 pH 为 4.0 到 11.0 之间稳定。结合图 2 中 pH 变化趋势，发酵液于第 4 d 的 pH 值开始低于 4.0，而图 7 中 SOD 在 4~7 d 为最高，主要因为西兰花内成分溶出，以及 pH 刚开始低于 4.0；7 d 后由于西兰花成分基本溶出及 pH 不断降低，从而导致了 SOD 不断下降；后期发酵液条件稳定，SOD 保持不变。

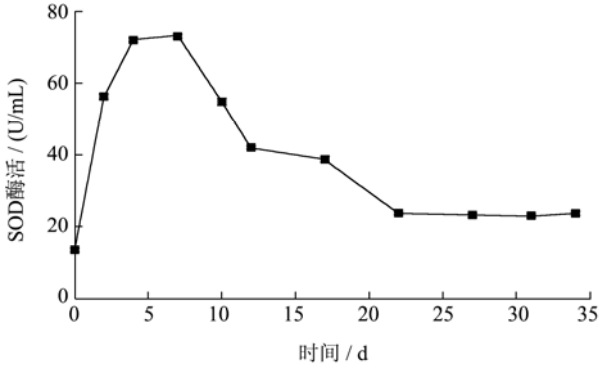


图 7 发酵过程中 SOD 酶活变化

Fig.7 Changes in superoxide dismutase activity during fermentation

2.7 西兰花酵素在发酵过程中氧自由基吸收能力（ORAC）变化

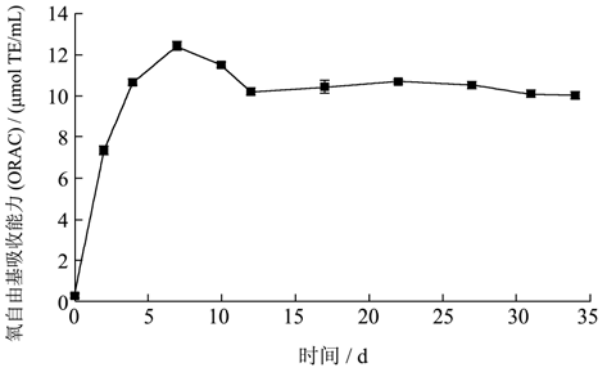


图 8 发酵过程中抗氧化能力指数变化

Fig.8 Changes in oxygen radical absorbance capacity during fermentation

氧自由基吸收能力分析主要针对亲水过氧基、氢氧基、亲脂过氧基、超氧阴离子和单线态氧进行分析，

可作为评价抗氧化能力指标。西兰花酵素发酵过程中氧自由基吸收能力变化如图 8 所示。

由图 8 所示，在发酵过程中，西兰花在发酵过程中氧自由基吸收能力于第 7 d 达到最高，为 12.23±0.21 μmolTE/mL，7 d 后稍有下降，12 d 后维持在 10.00 μmolTE/mL 左右。结合总酚在发酵过程中的变化趋势，氧自由基吸收能力在前 7 d 也呈现迅速升高趋势，但后期有所降低，与酚类物质在发酵过程中发生物质转化及酵母利用糖原生成水而稀释发酵液有关。结合图 5 发酵过程中总酚的变化情况，氧自由基吸收能力与总酚有一定相关性。

2.8 西兰花酵素总酚与抗氧化相关性分析

对西兰花酵素总酚与 SOD、DPPH 和 ORAC 进行了 Pearson 法相关性分析，结果如表 2 所示。

表 2 西兰花酵素总酚与抗氧化性相关分析

Table 2 Correlation between total phenolic content and antioxidant activity of broccoli enzyme

	总酚	SOD	DPPH	ORAC
总酚	1			
SOD	0.414	1		
DPPH	0.881**	0.715*	1	
ORAC	0.993**	0.458	0.887*	1

注：**极显著相关（p<0.01）；*显著相关（p<0.05）。

结果显示，总酚与 SOD、DPPH 和 ORAC 之间的相关系数分别为 0.414、0.881 和 0.993，表明总酚与 SOD 无明显相关性，与 DPPH、ORAC 之间相关性尤为显著（p<0.01）。

3 结论

3.1 通过对西兰花酵素发酵过程中 pH 值、菌落总数、总糖、乳酸和乙酸的测定，更好掌握西兰花酵素在发酵过程中的动态变化，为后续实验西兰花酵素监控提供数据参考。西兰花酵素发酵初液口感柔和，味道酸甜，内含乳酸、乙酸能够调节人体肠道，促进新陈代谢。

3.2 西兰花是一种抗氧化性较好的蔬菜，通过检测发酵过程中总酚、DPPH 自由基清除率、SOD 酶活、ORAC 抗氧化性指标，观察发酵过程中西兰花酵素抗氧化性变化情况。结果显示，发酵过程中抗氧化性前 7 d 增加，7 d 后趋于平稳，其抗氧化性测定指标 DPPH、ORAC 整体变化趋势与总酚的变化趋势大致相同，而 SOD 酶活后期发酵下降趋势明显，主要原因为 pH 值的降低。其 DPPH 自由基清除率相较于抗氧化性高的桑葚酵素（实验室自制）高，在一定程度上抗氧化性较好。是一种口感佳，抗氧化性较好的西兰花酵素食品。

参考文献

[1] Lv J, Wu J, Zuo J, et al. Effect of Se treatment on the volatile compounds in broccoli [J]. Food Chemistry, 2017, 216: 225-233

[2] 徐萌.现代生活中关于酵素市场经济发展的探究[J].经营管理者, 2016,22:183
XU Meng. The research of jiaosu market economy development in modern life [J]. Journal of Management, 2016, 22: 183

[3] 何嘉欣.台湾酵素营养保健品产业现状分析[J].海峡科技与产业,2013,10:77-82
HE Jia-xin. Taiwan enzyme nutrition health care products industry present situation analysis [J]. Technology and Industry Across the Straits, 2013, 10: 77-82

[4] 毛建卫,吴元锋,方晟.微生物酵素研究进展[J].发酵科技通讯,2010,39(3):42-44
MAO Jian-wei, WU Yuan-feng, FANG Sheng. The research progress of microbial jiaosu [J]. Fermentation Technology Newsletter, 2010, 39(3): 42-44

[5] 陈倩,刘善江,李亚星.我国酵素菌技术概况及应用现状[J].安徽农业科学,2012,40(23):11612-11615
CHEN Qian, LIU Shan-jiang, LI Ya-xing. General situation and application of BYM technology in China [J] Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(23): 11612-11615

[6] 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
LIU Jia-you, WANG Zhen-bin. The research of microbial ferment food [J]. Food Fermentation Industries, 2016, 42(1): 273-276

[7] 吴广辉,毕韬韬.西兰花营养价值及深加工研究进展[J].农产品加工,2015,21:61-63
WU Guang-hui, BI Tao-tao. Advances innutritional value and deep processing of broccoli [J]. Farm Products Processing, 2015, 21: 61-63

[8] 防癌又抗衰老西兰花营养价值高[J].黑龙江科学,2013,4(8):128
To prevent cancer and aging, broccoli high nutritional value [J]. Heilongjiang Science, 2013, 4(8): 128

[9] 王晓梅,崔坤,陆艳玲.中国西兰花应用价值及生产、出口前景分析[J].中国农学通报,2008,24(11):478-480
WANG Xiao-mei, CUI Kun, LU Yan-ling. Overview of applicable value and production and export prospect of

chinese broccoli [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(11): 478-480

[10] 西兰花营养价值高[J].中国市场,2009,3:79
Broccoli High Nutritional Value [J]. Market of China, 2009, 3: 79

[11] Randazzo W, Corona O, Guarcello R, et al. Development of new non-dairy beverages from mediterranean fruit juices fermented with water kefir microorganisms [J]. Food Microbiology, 2016, 54: 40-51

[12] Bachiega P, Salgado J M, de Carvalho J E, et al. Antioxidant and antiproliferative activities in different maturation stages of broccoli (brassica oleracea italica) biofortified with selenium [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 771-776

[13] GB 4789.2-2010,食品安全国家标准 食品微生物学检验.菌落总数测定[S]
GB 4789.2-2010, National food safety standards food microbiological examination [S]

[14] 袁文杰,孔亮,孜力汗,等.高效液相色谱法测定克鲁维酵母菊芋发酵液中的乙醇,糖和有机酸类代谢成分[J].分析化学,2009,37(6):850-854
YUAN Wen-jie, KONG Liang, MU Li-han, et al. Simultaneous determination of ethanol, sugar and organic acid metabolism in jerusalem artichokecrewe yeast fermentation liquor using high performance liquid chromatography [J]. Analytical Chemistry, 2009, 37(6): 850-854

[15] 杨明琰,张晓琦,沈俭,等.超氧化物歧化酶两种邻苯三酚自氧化测定活力方法的比较[J].微生物学杂志,2006,26(3): 40-42
YANG Ming-yan, ZHANG Xiao-qi, SHEN Jian, et al. SOD activity determination comparison between two pyrogallol autoxidation [J]. Journal of Microbiology, 2006, 26(3): 40-42

[16] 徐维盛,李东,刘静,等.ORAC 法对 12 种水果总抗氧化能力评价研究[J].食品工业,2014,1:247-250
XU Wei-sheng, LI Dong, LIU Jing, et al. Study on antioxidant activities of 12 kinds of fruit [J]. Journal of Food Industry, 2014, 1: 247-250

[17] Li X, Xu W, Yang J, et al. Effects of applying llactic acid bacteria to the fermentation on a mixture of corn steep liquor and air-dried rice straw [J]. Animal Nutrition, 2016, 2(3): 229-233

[18] Xu F, Tang Y, Dong S, et al. Reducing yellowing and enhancing antioxidant capacity of broccoli in storage by sucrose treatment [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112: 39-45

[19] Shahidi F, Alasalvar C, Liyana-Pathirana C M. Antioxidant phytochemicals in hazelnut kernel (*Corylus Avellana L.*) and Hazelnut byproduct [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(4): 1212-1220

[20] 刘美珍,魏宜琴.超氧化物歧化酶[J].海峡药学,1998,10(1): 72-74
LIU Mei-zhen, WEI Yi-qin. Superoxide dismutase [J]. Strait Pharmaceutical Journal, 1998, 10(1): 72-74

现代食品科技