



## 紫色红曲霉对沙棘青稞复合酵素性能的影响研究

朱雪洋, 陶瑾, 张莉方, 徐宁莉, 张国强\*

安徽工程大学生物与食品工程学院, 安徽 芜湖 241000

朱雪洋, 陶瑾, 张莉方, 徐宁莉, 张国强. 紫色红曲霉对沙棘青稞复合酵素性能的影响研究. 微生物学报, 2022, 62(12): 4825–4840.

Zhu Xueyang, Tao Jin, Zhang Lifang, Xu Ningli, Zhang Guoqiang. Effect of *Monascus purpureus* on the characteristics of sea buckthorn-highland barley complex Jiaosu. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(12): 4825–4840.

**摘要:**【目的】为了对比分析紫色红曲霉是否对沙棘青稞酵素具有促进作用。【方法】以对照组、沙棘组、沙青组、沙青红曲组 4 种发酵液为研究对象, 对其 pH、总糖、总酸、可溶性固形物、总酚、总黄酮、抗坏血酸和洛伐他汀、超氧化物歧化酶、脂肪酶和蛋白酶含量、1,1-二苯基-2-苦茶肼自由基清除能力、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)阳离子自由基清除能力、酵母菌活菌数和乳酸菌活菌数进行比较分析。【结果】沙青红曲组的总酚、总黄酮、抗坏血酸和洛伐他汀、超氧化物歧化酶、脂肪酶和蛋白酶含量、1,1-二苯基-2-苦茶肼自由基清除率、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)阳离子自由基清除率、酵母菌活菌数和乳酸菌活菌数均显著高于沙棘组和沙青组( $P < 0.05$ )。【结论】该研究证明了紫色红曲霉的添加可提高酵素的性能, 对酵素行业的多元化发展有潜在的促进作用。

**关键词:** 紫色红曲霉; 生物活性物质; 功能酶活力; 抗氧化活性; 微生物活菌数

**基金项目:** 安徽省重点研发计划项目(201904e01020008); 西藏自治区重点研发项目(XZ202001ZY0040N); 安徽工程大学中青年拔尖人才项目(2018–2019)

Supported by the Key Research and Development Program of Anhui Province (201904e01020008), by the Tibet Autonomous Region Key Research and Development Project (XZ202001ZY0040N) and by the Anhui Polytechnic University Young and Middle-Aged Talents Project (2018–2019)

\*Corresponding author. E-mail: guoqiang2008@163.com

Received: 27 March 2022; Revised: 10 June 2022; Published online: 24 June 2022

# Effect of *Monascus purpureus* on the characteristics of sea buckthorn-highland barley complex Jiaosu

ZHU Xueyang, TAO Jin, ZHANG Lifang, XU Ningli, ZHANG Guoqiang\*

College of Biological and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China

**Abstract:** [Objective] To analyze whether *Monascus purpureus* can improve the characteristics of sea buckthorn-highland barley complex Jiaosu. [Methods] The pH, total sugar, total acids, soluble solids, total phenols, total flavonoids, ascorbic acid and monacolin K, superoxide dismutase, lipase, protease, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging rate, 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) free radical scavenging rate, number of active yeast, and number of active lactobacilli were compared between control group, sea buckthorn group, sea buckthorn-highland barley Jiaosu group, and sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* group. [Results] The sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* group had higher total phenols, total flavonoids, ascorbic acid and monacolin K, superoxide dismutase, lipase, protease, DPPH free radical scavenging rate, ABTS free radical scavenging rate, number of active yeast, and number of active lactobacilli than the sea buckthorn group and the sea buckthorn-highland barley Jiaosu group ( $P < 0.05$ ). [Conclusion] The addition of *M. purpureus* can improve the characteristics of Jiaosu and plays a potential role in promoting the diversified development of the Jiaosu industry.

**Keywords:** *Monascus purpureus*; bioactive substances; functional enzyme activity; antioxidant activity; live microbial count

红曲，又称红曲霉，是一种小型丝状真菌，嗜酸<sup>[1]</sup>。红曲霉发酵代谢可以产生多种活性物质，包括蛋白酶、淀粉酶、红曲色素和洛伐他汀(monacolin K, MK)等，使得红曲具有极高的药用价值和食用价值<sup>[2]</sup>。红曲中的红曲色素具有抗癌、着色和抑菌防腐等功效，常被用于到肉制品当中<sup>[3]</sup>。黄酒常加入红曲发酵，不仅可以酒味香醇、酯味浓厚，还可以赋予酒体独特的棕红色<sup>[4-5]</sup>。此外，红曲中含有特有的降脂功能物质 MK，使红曲黄酒具有降血脂、降胆固醇等功效<sup>[2]</sup>。

目前，我国酵素产业发展迅速，但是市场上的酵素种类单一、质量参差不齐以及大部分的酵素研究局限于原料的组成<sup>[6]</sup>。沙棘相较于其他水果含有较高的维生素和黄酮类物质<sup>[7]</sup>，

青稞相较于其他类粮食，具有“三高两低”的特点<sup>[8]</sup>，因此具有较高的研究价值，且市场上关于沙棘青稞复合酵素的研究未见报道。

酵素是利用水果、蔬菜和中草药为原料发酵而成的富含多种生物活性物质的产品<sup>[9]</sup>。酵素具有众多保健作用，如促进消化<sup>[10]</sup>、消炎抗菌<sup>[11]</sup>和解酒<sup>[12]</sup>。关于沙棘酵素的报道一般为自然发酵，很少采用人工接种发酵；张琪等<sup>[13]</sup>通过高通量测序分析沙棘酵素自然发酵中的细菌多样性时发现，优势菌种为蓝藻细菌门、变形门、未知细菌菌门、酸杆菌门和厚壁菌门。关于菌种和酵素性能的研究鲜有报道，其中关于红曲霉运用到酵素上更是尚未报道。目前，酵素一般采用酵母菌、乳酸菌和醋酸菌等菌种发酵，为研究红曲霉是否能提高酵素的生物活性

物质、抗氧化性和微生物活菌数, 分别测定对照组、沙棘组、沙青组和沙青红曲组的理化成分、生物活性物质、抗氧化活性及微生物活菌数, 并分析差异, 为酵素行业的开发提供理论依据, 促进酵素行业的进一步发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

材料: 沙棘(购自西藏错那)、青稞(购自西藏拉萨)、白砂糖(购自超市)、紫色红曲 *Monascus purpureus* CICC 5046 (购自中国工业微生物菌种保藏管理中心)、酵母菌和乳酸菌(购自安琪酵母公司)。

试剂: 福林酚试剂(BR)、甲醇、苯酚、乙醇、酚酞、NaOH、芦丁标品(95%)、碳酸钠、没食子酸标品(99%)、NaNO<sub>3</sub>、Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>、焦性没食子酸、抗坏血酸(V<sub>C</sub>)、三(羟甲基)氨基甲烷、乙二胺四乙酸二钠、2,2-联苯基-1-苦基肼基(DPPH)、2,2-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS)均是(AR)购自国药集团化学试剂有限公司, 6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid, Trolox)、橄榄油、聚乙烯醇 1750、L-酪氨酸、酪蛋白均是(AR)、乳酸(90%)、乳酸钠(80%)、磷酸(85%–90%, HPLC)、洛伐他汀(≥98%)、乙腈(HPLC)购自阿拉丁公司。

### 1.2 仪器与设备

HN-60BS 培养箱, 力辰科技有限公司; BS-1EA 振荡培养箱, 江苏杰瑞尔电器有限公司; VD-850 超净工作台, 苏州净化设备有限公司; JW-2017HR 冷冻离心机, 安徽嘉文仪器设备有限公司; DGL-100GI 灭菌锅, 力辰科技有限公司; UV-5200 紫外分光光度计, 上海元析仪器设备有限公司; PHS-2F pH 计, 上海雷磁

有限公司; T960 全自动滴定仪, 济南海能股份有限公司; UltiMate3000 液相色谱仪, 赛默飞有限公司。

### 1.3 不同酵素的工艺流程

酵素的制备工艺流程如图 1 所示。

### 1.4 原料预处理

沙棘果用清水清洗、捏碎, 65 °C 加热 30 min; 青稞用清水清洗、浸泡 3–6 h, 晾干。

### 1.5 菌种的活化及培养

酵母菌和乳酸菌为发酵剂, 加入 10–20 倍的无菌水 37 °C 活化 30 min。红曲霉的活化采用 PDA 液体培养基, 温度 30 °C, 转速 180 r/min, 培养 3–5 d, 转接 2 次后用种子培养液培养 3–4 d, 制成约 10<sup>7</sup> CFU/mL 孢子悬浮液, 然后用 4 层纱布滤掉菌丝体, 制得种子发酵液。

PDA 培养基(g/L): 土豆 200, 葡萄糖 20, 琼脂 15–20;

种子培养基(g/L): 葡萄糖 60, 蛋白胨 25, NaNO<sub>3</sub> 2, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 1, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.1%。

### 1.6 酵素的制备图片

菌丝光学显微镜观察: 干净的载玻片中央滴 1 滴 70%乙醇, 无菌操作, 用酒精灼烧过的解剖针挑取少量菌丝浸入乙醇中, 仔细轻轻将菌丝展开; 捏住盖玻片的一端与染色液接触, 轻轻放下玻片, 不要产生气泡也不要按盖玻片, 以免孢子脱落菌丝变形。

### 1.7 酵素的感官评价

参考余思洁等<sup>[14]</sup>的方法, 结合酵素产品的感官特点, 对酵素进行感官评价, 取过滤澄清后的酵素样品各 100 mL, 由 10 位接受过感官评价培训的专业人员(5 男 5 女)根据组织形态、香气、色泽、滋味和口感标准进行评分, 感官评价标准见表 1。感官评价试验时, 样品不作预处理, 直接进行。分析检测时, 样品分别稀释相应的倍数。乳酸菌测定时, 取未灭菌前的样品。

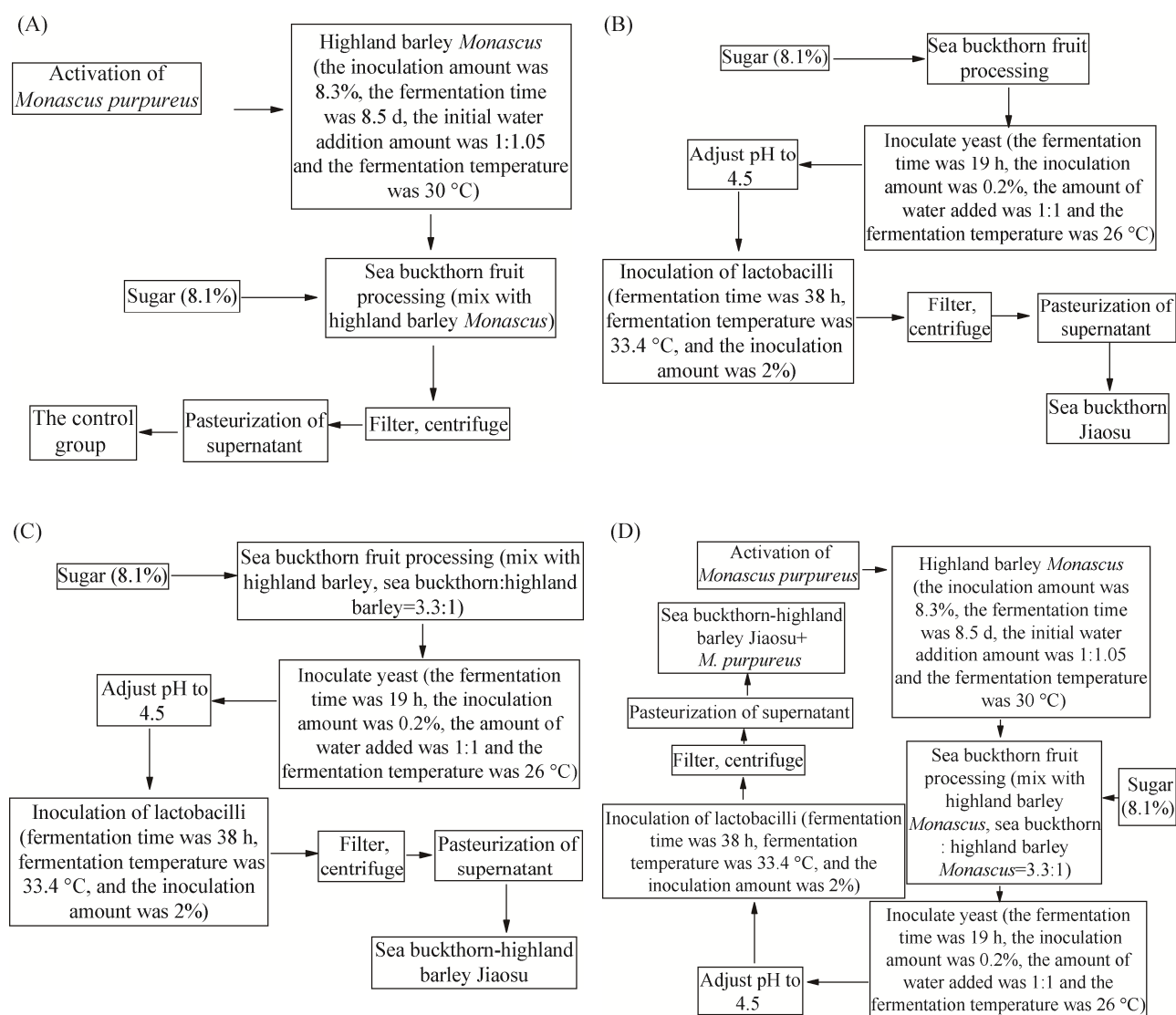


图 1 不同酵素的制备工艺

Figure 1 Preparation technology of different Jiaosu. A is denoted by WS; B is denoted by SJ; C is denoted by SQ; D is denoted by SH.

### 1.8 酵素理化成分的测定

pH 的测定：参考 GB 5009.237—2016《食品 pH 值的测定》，使用 pH 计校准后测定各酵素的 pH 值。

总糖含量的测定：参考 SN/T 4260—2015《出口植物源食品中粗多糖的测定》使用苯酚硫酸法测定。

总酸含量(以苹果酸计)的测定：参考 GB

12456—2021 食品安全国家标准食品中总酸的测定，结果以苹果酸的质量浓度计。

可溶性固形物的测定：利用校准后的手持式折光仪滴定不同酵素的溶液，测定其含量。

### 1.9 总酚含量的测定

参考崔鑫<sup>[15]</sup>的方法，以没食子酸为标准品，绘制标准曲线： $y=2.489\ 0x+0.398\ 7$  ( $R^2=0.999\ 6$ )。

表 1 不同酵素感官评分标准

Table 1 Different sensory scoring criteria for Jiaosu

Evaluation indicators	Scoring criteria	Score
Organizational status (10)	Clear and translucent, no precipitation	8-10
	Small amount of sediment or suspended matter	4-7
	Turbidity, more precipitation	0-3
Color (10)	Bright color, uniform and consistent	8-10
	Slightly heavy color, slightly uneven	4-7
	Color dim, stray colors, uneven colors	0-3
Palate (10)	Smooth mouthfeel, no obvious graininess	8-10
	Average smoothness, with a grainy feel	4-7
	Poor smoothness and excessive graininess	0-3
Taste (10)	No offensive taste, sweet and sour, excellent taste, harmonious taste	8-10
	Average harmony of taste, sour or sweet	4-7
	Off-odor, too sour or too sweet, no pleasant taste	0-3
Fragrance (10)	Mellow aroma	8-10
	The smell of wine or vinegar in the fragrance is too heavy	4-7
	Excessive bitterness or unacceptable odor	0-3

### 1.10 总黄酮含量的测定

参考孟想等<sup>[16]</sup>的方法,以芦丁为标准品,绘制标准曲线: $y=0.1211x-0.0256$  ( $R^2=0.9997$ )。

### 1.11 抗坏血酸(Ascorbic acid, VC)含量的测定

参考崔鑫<sup>[15]</sup>的方法,以抗坏血酸为标准品,绘制标准曲线  $y=3.7714x+0.0008$  ( $R^2=0.9923$ )。

### 1.12 MK 含量的测定

参考 QB/T 2847—2007 中华人民共和国轻工行业标准功能性红曲米(粉)和吴玉峰<sup>[2]</sup>的测定方法。分别以 2.5、5、10、17 和 20  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的 MK 绘制标准曲线,以峰面积  $y$  对质量浓度  $x$  进行回归方程,回归方程  $y=1.0441x$  ( $R^2=0.9995$ )。

### 1.13 功效酶含量的测定

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)酶活力的测定:参考 GB/T 5009.171—2003 保健食品中超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定。

脂肪酶活力的测定:参考 GB/T 23535—2009,使用滴定法进行测定。

蛋白酶活力的测定:参考 GB/T 23527—

2009,用福林法进行测定,以 L-酪氨酸为标准品绘制标准曲线: $y=0.0930x+0.0691$  ( $R^2=0.9997$ )。

### 1.14 DPPH 自由基清除能力的测定

根据 Kim<sup>[17]</sup>的方法分析了样品的 DPPH 自由基清除能力。首先制备 100 mmol/L 的 DPPH 甲醇溶液,然后用 80%甲醇溶液稀释为 0.1 mmol/L 的工作液。取 0.1 mL 样品提取液于试管中,加入 2 mL 稀释后的 DPPH 工作液,用 80%甲醇补足体积为 4 mL,混匀,于黑暗条件下反应 30 min,并在 517 nm 处测量吸光度。以 Trolox 浓度为横坐标,吸光度为纵坐标绘制标准曲线: $y=-0.1382x+0.7060$  ( $R^2=0.9996$ )。

### 1.15 ABTS 自由基清除能力的测定

根据孟想等<sup>[16]</sup>的方法取 0.031 g 过硫酸钾溶解后,转入 50 mL 容量瓶中,再加入 0.192 g ABTS 试剂,摇匀后室温下放置 12-16 h (产生 ABTS 阳离子自由基),然后用 80%甲醇稀释使其在 734 nm 处吸光度为  $0.7\pm 0.02$  (现配现用)。取 0.2 mL 样品提取液于试管中加入 4 mL ABTS

工作液，用 80% 甲醇溶液补足体积为 5 mL，避光反应 30 min，并在 734 nm 处测定吸光值。以 Trolox 浓度为横坐标，吸光度为纵坐标绘制标准曲线： $y = -0.0461x + 0.2905$  ( $R^2 = 0.9991$ )。

### 1.16 微生物活菌数的测定

酵母菌活菌数的测定：参照平板培养法(倾注法)的测定<sup>[18]</sup>。将平板连续稀释 2–3 个梯度，计数。

乳酸菌活菌数的测定：参考 GB4789.35—2016 食品安全国家标准食品微生物学检验乳酸菌检验。不同酵素乳酸菌活细胞数采用平板计数的方法，分别计数 MC 培养基和 MRS 培养基的活菌数，MC 培养基和 MRS 培养基活菌数之和为乳酸菌活菌数。

### 1.17 数据处理与分析

所有试验均重复 3 次，结果取平均值。采用 SPSS 22.0 和 Excel 2019 软件进行数据处理分析，使用 Origin 2019 软件绘图。 $P < 0.05$  表示差异显著， $P < 0.01$  表示差异极显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 酵素的制备图片

紫色红曲霉接种到 PDA 培养基上，30 °C 恒温避光培养 6 d，初期的菌丝呈白色，后期的

菌丝呈红色。从图 2 可以看出，培养 2 d 的菌丝较短，4 d 和 6 d 的菌丝明显较长，且 6 d 的菌丝相较于 2 d、4 d 的含有更多的红曲色素。

青稞红曲的制备方法参考图 1A，从图 3 可以看出，随着发酵的进行，从 0–3 d，红曲霉先长出白色菌丝附着于青稞的表面，到第 6 d 时菌丝大部分已变成红色，还含有少数白色菌丝，到第 9 d 时，菌丝已全部变红。这和毛继龙等<sup>[19]</sup>筛选高产洛伐他汀的红曲霉菌丝图相似。

酵素的制备方法参考图 1 (下同)，从图 4 可以看出刚开始发酵时 3 组酵素的溶液颜色较为接近，接种酵母菌发酵完之后，沙棘组和沙青组的颜色较为接近，沙青红曲组较另 2 组颜色更深。接种乳酸菌发酵完之后，沙青组的颜色较沙棘组有一丝青色，沙青红曲组依旧是橘黄色。从图 3D 可以看出，沙棘组的发酵颜色无明显变化，沙青组由黄色变成黄青色，沙青红曲组的颜色逐渐变为橘黄色。沙青红曲组相较于对照组，颜色明显变深，这是沙青红曲组中的红曲色素溶解到沙棘果浆中，也有可能微生物的作用<sup>[20]</sup>。沙棘组与沙青组的颜色较为接近的原因是 2 组的原料相似且发酵菌种一致。

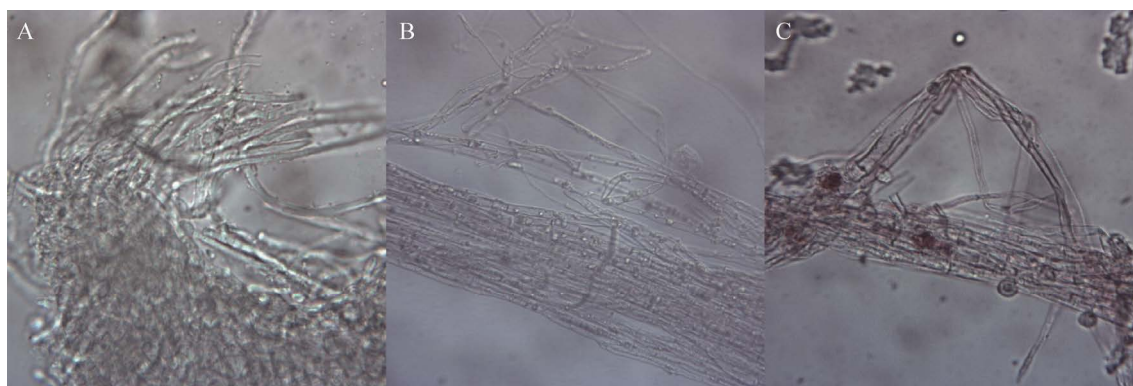


图 2 不同时期的紫色红曲菌丝

Figure 2 *Monascus purpureus* mycelium in different periods. A: 2 d; B: 4 d; C: 6 d.





图 3 不同时期的青稞红曲

Figure 3 Highland barley *Monascus* in different periods. A: 0 d; B: 3 d; C: 6 d; D: 9 d.

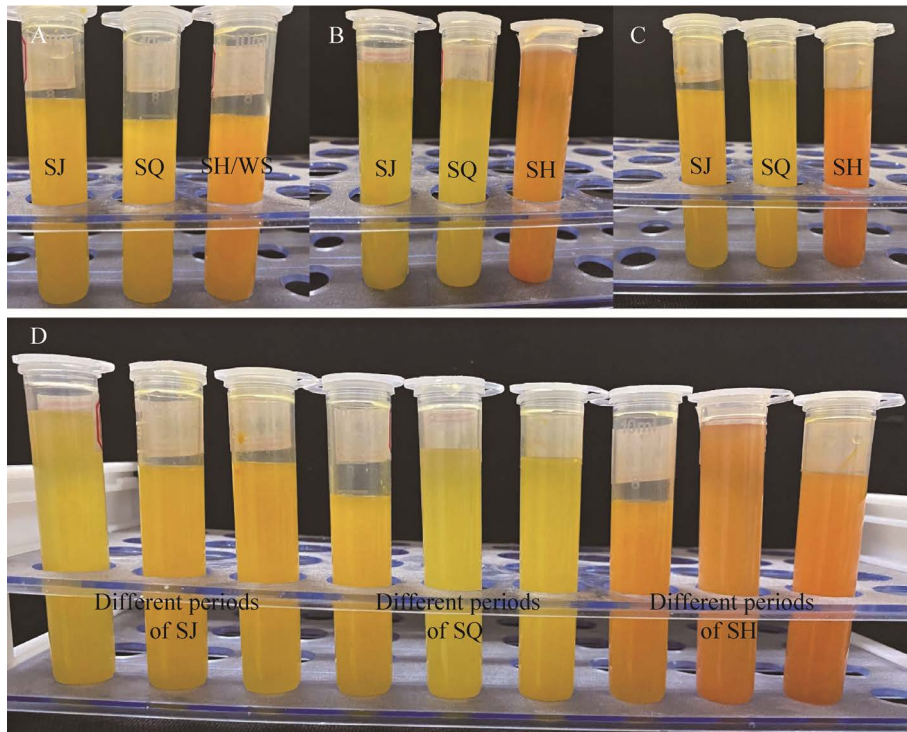


图 4 不同时期的酵素提取液

Figure 4 Jiaosu extracts in different periods. The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH. A: unfermented SH; B: after yeast fermentation; C: after lactobacilli fermentation; D: different periods of SJ, SQ and SH.

## 2.2 感官评定分析

通过表 1 的方法得到的感官评定结果如图 5 所示。沙棘、沙青和沙青红曲组在组织状态、色泽和香气 3 个方面评分较高, 得分在 8 分以上, 产品香味醇正, 颜色明亮, 无沉淀, 略有一丝酸味, 总体的评分还不错。沙青红曲组颜色呈现橘红色, 另外 2 组呈现橘黄色, 发酵前产品的味道呈现很浓的果酸味, 发酵后产品呈现醇香味, 其中沙棘、沙青组香气没有沙青红曲组醇正。沙青红曲组在口感方面比沙棘、沙青组更加酸甜。刘凡等<sup>[21]</sup>在研究洋河浓香型白

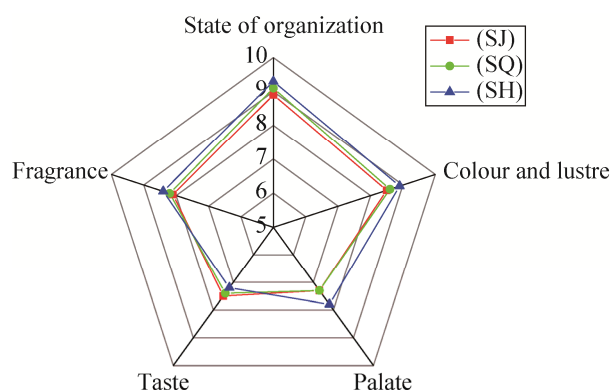


图 5 酵素感官评价雷达图

Figure 5 Jiaosu sensory evaluation radar map. Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

表 2 不同酵素的理化指标对比

Table 2 Physical and chemical indexes of different Jiaosu

Sample number	pH	Total sugar/(mg/mL)	Total acid/(mg/mL)	Soluble solids/%
WS	3.18±0.05a	269.56±0.64a	31.01±1.72b	14.37±0.06a
SJ	2.77±0.02d	180.42±3.80b	39.87±0.76a	4.53±0.06b
SQ	2.85±0.02c	131.13±2.01c	39.32±4.13a	4.37±0.06c
SH	2.94±0.02b	24.64±0.79d	37.39±2.45a	3.93±0.06d

Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P < 0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

酒中发现, 窖内发酵过程中主要有有机酸合成与多个菌属相关, 其中包括乳酸菌属、葡糖球菌属、酵母菌属、伊萨酵母属、嗜冷芽孢杆菌属和根霉属。这说明其中的酸味可能与 3 种菌种均有关系, 加入了红曲霉之后, 能够促进酵母菌和乳酸菌产生更高的有机酸含量。

## 2.3 不同酵素理化成分

从表 2 可知, 3 种酵素的 pH 值都较低, 是由于沙棘果本身的 pH 较低。发酵前的 pH 为 3.18, 发酵后的 pH 均降低, 由于发酵的糖转为酸, 沙青红曲组和沙青组相对于沙棘组的 pH 较高的原因可能是原料有一部分青稞。陈小伟等<sup>[22]</sup>通过研究草莓酵素自然发酵过程中总糖、总酸含量和 pH 值的变化表明, 发酵初期酵母菌等微生物大量繁殖, 糖类含量显著下降, 生成大量的次级代谢产物(乳酸和醋酸等有机酸), 总酸含量显著增加。这与沙青红曲组以及对照组的含量变化相似。沙棘组、沙青组总酸含量和可溶性固形物含量较接近的原因可能是接菌量相同。沙青红曲组的总酸含量低于沙青组的原因可能是因为糖转化为酯类物质, 它可以促进部分酸类物质和乙醇的反应<sup>[20]</sup>。沙青红曲组的总糖和可溶性固形物相对于沙青组较低的原因可能是青稞红曲中含有大量的糖化酶<sup>[23]</sup>, 促进了后续酵母菌和乳酸菌的生长繁殖。



## 2.4 总酚含量

沙棘中的酚类物质种类丰富,具有一定的抗氧化性。从图 6 可以看出,对照组、沙棘组、沙青组和沙青红曲的总酚含量分别为 1.88、2.11、2.00 和 2.38 mg/mL。Chu 等<sup>[24]</sup>的研究表明发酵过程中微生物会把复杂的大分子酚类物质转换成小分子物质,使酚类含量增加;沙青红曲组与对照组相较显著提高( $P<0.05$ ),这说明发酵会提高总酚含量。沙棘组和沙青组的总酚含量没有显著性差异( $P<0.05$ ),可能是由于 2 组酵素的发酵菌种相同且原料相差不大。沙青红曲组的总酚含量显著高于其他 2 组酵素( $P<0.05$ ), Ghosh 等<sup>[25]</sup>的研究表明乳酸菌产生的酶类及有机酸使酚类物质溶出并呈游离态,导致发酵过程中总酚含量上升,因此原料与发酵体系中微生物种类共同影响发酵过程中酚类物

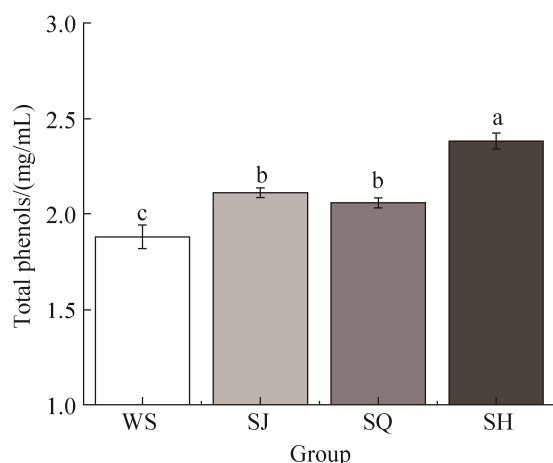


图 6 不同酵素的总酚含量

Figure 6 Total phenol content of different Jiaosu. Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

质的积累。此外,赵文红等<sup>[26]</sup>通过分析红曲、酒药和麦曲发现,3 种曲复配酿造出来的黄酒总酚含量最高,并且适当增加红曲的用量可以提高黄酒中总酚的含量。这说明适当添加红曲可以提高总酚的含量。

## 2.5 总黄酮含量

沙棘中酚类物质种类较多,其中总黄酮的含量较为丰富。从图 7 可以看出,对照组、沙棘组、沙青组和沙青红曲的总黄酮含量分别为 1.01、1.29、1.15、和 1.48 mg/mL。沙青红曲组含量相对于对照组,有显著性提高( $P<0.05$ ),原因可能是水解酶促进了结合肽多酚的释放<sup>[27]</sup>。沙棘组的总黄酮的含量略高于沙青组的原因是沙棘果中本身含有大量的黄酮类物质,而沙青组中由于加入了青稞,会影响其黄酮类的含量。沙青红曲组的总黄酮含量显著高于沙青

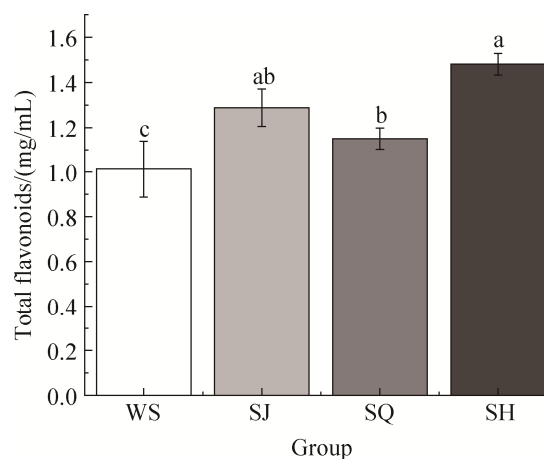


图 7 不同酵素的总黄酮含量

Figure 7 Total flavonoid content of different Jiaosu. Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

组 ( $P<0.05$ ), 可能是沙青红曲组中红曲霉的代谢产物, 进一步促进酵母菌及乳酸菌代谢产生酶系将部分碳源转化为可以发生显色反应的邻苯二酚结构, 增加了黄酮类物质的含量<sup>[28]</sup>。

## 2.6 抗坏血酸含量

V<sub>C</sub>是植物中重要的营养元素之一, 也是人体必需的营养元素之一。沙棘中 V<sub>C</sub> 的含量极高, 被称为 V<sub>C</sub>之王, 是橘子的 20 多倍。有研究表明, 发酵可以促进果实中 V<sub>C</sub>的充分释放<sup>[29]</sup>。由图 8 可知, 对照组、沙棘组、沙青组和沙青红曲的 V<sub>C</sub> 含量分别为 0.06、0.10、0.18 和 0.22 mg/mL。沙青红曲组 V<sub>C</sub> 含量显著高于对照组 ( $P<0.05$ ), 原因可能是微生物代谢产生大量的有机酸。赵毅等<sup>[30]</sup>在研究蓝果忍冬果实中主要糖酸组分时, 也发现其除了来源于原料中的 V<sub>C</sub> 溶出, 在酵素主要发酵期间,

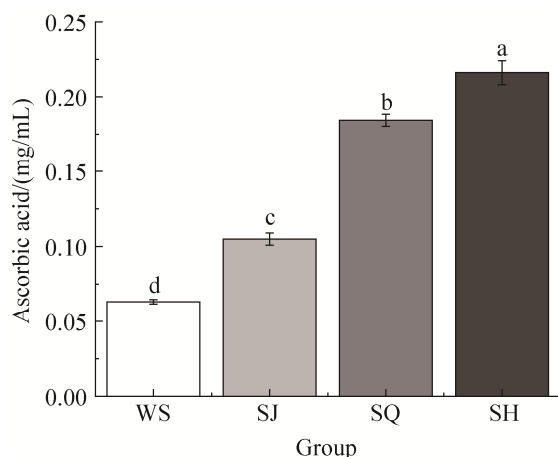


图 8 不同酵素的抗坏血酸含量

Figure 8 Ascorbic acid content of different Jiaosu. Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

酵母消耗糖原进行糖酵解和三羧酸循环等过程产生大量代谢产物包括酸类、醇类等其他物质, 同时生成 V<sub>C</sub>, 分析其 V<sub>C</sub> 含量发生变化的原因为微生物发酵代谢引起的变化。沙青红曲组相较于沙青组含量较高的原因可能是红曲霉产生的次级代谢产物能够促进酵母菌和乳酸菌的生长繁殖。

## 2.7 MK 含量

MK 是红曲霉的特有产物, 不仅对胆固醇水平具有保护作用, 也对骨质疏松症、癌症等其他病症具有保护作用<sup>[31]</sup>。从表 3 可知, 在对照组、沙棘组和沙青组未检测到 MK 的含量, 沙青红曲组中可以检测到 MK。沙青红曲组酵母菌发酵结束后 MK 的含量为 1.93  $\mu\text{g/mL}$ , 乳酸菌发酵结束后 MK 含量为 1.99  $\mu\text{g/mL}$ 。蔡琪琪<sup>[20]</sup>在研究红曲酿造过程中红曲霉生长抑制因素时发现, 红曲酒中的 MK、色素主要来源于红曲原料, 红曲霉在黄酒发酵过程中受到乙醇等环境因素的影响, 生长受到抑制, 无法产生 MK, 与本文研究结果一致。说明接种乳酸菌前后的 MK 无较大差异可能是由于环境因素造成的。

## 2.8 功效酶活力

蛋白酶、脂肪酶和 SOD 是酵素的主要功效酶, 其主要作用是分解果蔬中的碳氮化合物<sup>[32]</sup>。从表 4 可以看出, 沙青红曲组的 SOD、脂肪酶和蛋白酶显著高于沙青组 ( $P<0.05$ ), 这说明接种红曲霉有利于功效酶的提高。吴玉峰<sup>[2]</sup>在红曲

表 3 不同酵素的 MK 测定

Table 3 MK count with different Jiaosu

Sample number	MK/ $(\mu\text{g/mL})$
WS	ND
SJ	ND
SQ	ND
SH	1.99 $\pm$ 0.15

ND: not detected.

表 4 不同酵素功效酶活力对比

Table 4 Comparison of enzyme activities with different Jiaosu functions

Sample number	SOD/(U/mL)	Lipase/(U/mL)	Protease/(U/mL)
WS	105.73±11.27d	1.26±0.14b	5.30±0.43b
SJ	336.92±11.28b	1.48±0.10b	5.45±0.29b
SQ	258.20±7.38c	1.28±0.02b	7.74±0.66b
SH	373.77±11.27a	4.05±0.21a	25.09±2.59a

Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

黄酒中的研究发现,红曲霉在发酵过程中可以产生多种酶类,如淀粉酶、糖化酶、蛋白酶等。其中淀粉酶能将淀粉分解成糊精、麦芽糖等,糖化酶接着将它们降解成葡萄糖。蛋白酶通常将大米的蛋白质分解为多肽、氨基酸等,既促进酵母快速繁殖,还为发酵后期醇类、醛类、酮类等风味物质的形成提供前体物质。这说明沙青红曲组中的红曲霉不仅本身可以产生功效酶,还可以将大分子物质转化为小分子物质,促进酵母菌和乳酸菌的继续发酵。沙青组和沙棘组的功效酶差异是因为原料的不同。沙青红曲组相较于对照组的含量提高,是因为发酵过程中微生物产生大量的次级代谢物,从而提高了功效酶的含量<sup>[33]</sup>。

## 2.9 不同酵素的 DPPH 清除能力

DPPH 被广泛运用于评价短时间内的抗氧化性。从图 9 可以看出,对照组、沙棘组、沙青组和沙青红曲的清除能力为等价于 Trolox 抗氧化能力分别为 8.28、12.43、11.32 和 16.11 mg/mL。沙青红曲组的 DPPH 的清除能力相对于对照组提高了 94.57%,相对于沙棘组提高了 29.6%,相对于沙青组提高了 42.31%。红曲青稞组相较于对照组有显著性差异( $P<0.05$ ),可能与发酵过程中酚类物质和有机酸的含量提高有关,这与 Carillon 等<sup>[34]</sup>的研究一致。陆方菊<sup>[23]</sup>发现红曲酒的抗氧化活性会随着红曲添加量的增多而增

强,说明添加红曲霉发酵提高 DPPH 自由基清除能力。

## 2.10 不同酵素的 ABTS 清除能力

从图 10 可以看出,ABTS 清除能力和 DPPH 清除能力相似,对照组、沙棘组、沙青组和沙青红曲的 ABTS 清除能力等价于 Trolox 抗氧化能

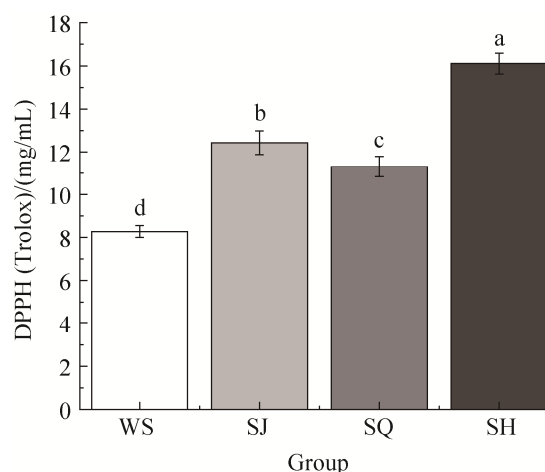


图 9 不同酵素的 DPPH 清除能力的测定

Figure 9 Determination of DPPH free radical scavenging rate of different Jiaosu. Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

力分别为 0.23、0.97、0.75 和 1.26 mg/mL。沙青红曲组的 ABTS 的清除能力显著高于沙棘、沙青和对照组( $P<0.05$ ), 相对于对照组提高了 447.83%, 相对于沙棘组提高了 29.9%, 相对于沙青组提高了 68%。沙青红曲组的 ABTS 清除能力相较于对照组有显著性差异的原因和 DPPH 清除能力提高的原因相似。徐文流等<sup>[35]</sup>通过对比试验发现红曲霉发酵可以提高金银花的抗氧化活性, 其中 ABTS 清除能力提高了 61.39%, DPPH 清除能力提高了 59.28%。此外, 蒋沅岐等<sup>[36]</sup>的研究表明红曲米产生的莫纳可林类、甾醇类、红曲色素等代谢产物具有一定的抗氧化能力, 说明添加红曲霉可以提高酵素的 ABTS 清除能力。

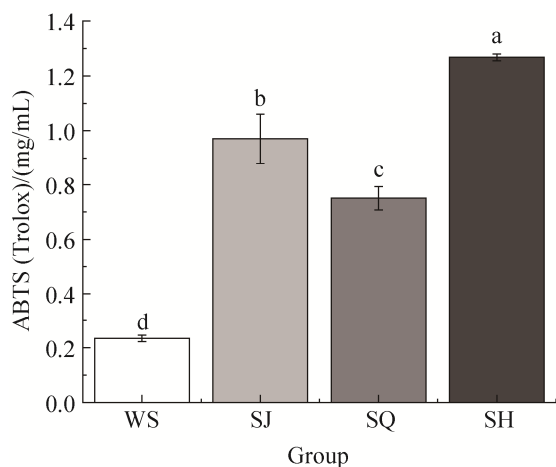


图 10 不同酵素的 ABTS 清除能力的测定

Figure 10 Determination of ABTS free radical scavenging rate of different Jiaosu. Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

## 2.11 不同酵素的微生物活菌数

由表 5 可知, 沙青红曲组的酵母菌和乳酸菌的活菌数分别为  $10.72 \times 10^6$  和  $10.01 \times 10^7$  CFU/mL。沙青红曲组的酵母菌和乳酸菌的活菌数显著高于对照组( $P<0.05$ ), 说明在发酵过程中, 红曲霉产生的代谢产物促进了后续的发酵。沙青组的和沙棘组的酵母菌活菌数无显著差异( $P<0.05$ ), 说明青稞并不是影响微生物含量的主要因素。沙青红曲组的微生物相较沙青组具有显著性差异( $P<0.05$ ), 车逸心等<sup>[37]</sup>在研究米酒的风味时, 也发现红曲霉可以促进酵母菌和乳酸菌生长。因此可以说明, 沙青红曲组的微生物活菌数高于沙青组和红曲霉的加入有一定关联。

## 2.12 沙青红曲酵素主要成分、抗氧化能力及微生物活菌数的相关性分析

从表 6 可知, 抗氧化能力主要和总酚、总黄酮、抗坏血酸、MK 和活性酶均呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 和总糖、可溶性固形物呈极显著负相关( $P<0.01$ ), 和总酸呈显著负相关( $P<0.05$ )。酵母菌活菌数和总酚、总黄酮、抗坏血酸、MK、功效酶以及抗氧化能力呈极显著相

表 5 不同酵素的微生物活菌数测定

Table 5 Determination of live microbial count with different Jiaosu

Sample	Number of active Yeast/(CFU/mL)	Number of active Lactobacilli/(CFU/mL)
WS	<100c	<100d
SJ	$(8.41 \pm 0.33) \times 10^6$ b	$(6.55 \pm 0.09) \times 10^7$ b
SQ	$(8.59 \pm 1.44) \times 10^6$ b	$(5.17 \pm 0.06) \times 10^7$ c
SH	$(10.72 \pm 0.36) \times 10^6$ a	$(10.01 \pm 0.19) \times 10^7$ a

Different lowercases indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ), the same lowercases indicate no significant differences between groups. Error bars indicate the standard deviation ( $n=3$ ). The control group is denoted by WS; Sea buckthorn Jiaosu group is denoted by SJ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu group is denoted by SQ; Sea buckthorn-highland barley Jiaosu+*M. purpureus* is denoted by SH.

表 6 相关性分析结果

Projects	pH	Total sugar	Total acid	Soluble solids	Total phenol	Total flavonoids	Vc	MK	SOD	Lipase	Protease	DPPH	ABTS	Number of active yeast	Number of active lactobacilli
pH	1.000														
Total sugar	0.975**	1.000													
Total acid	-0.938**	-0.880*	1.000												
Soluble solids	0.976**	1.000**	-0.882*	1.000											
Total phenol	-0.956**	-0.986**	0.871*	-0.987**	1.000										
Total flavonoids	-0.988**	-0.949**	0.921**	-0.951**	0.923**	1.000									
Vc	-0.977**	-0.998**	0.899*	-0.998**	0.991**	0.948**	1.000								
MK	-0.975**	-1.000**	0.879*	-1.000**	0.986**	0.949**	0.998**	1.000							
SOD	-0.979**	-0.998**	0.902*	-0.998**	0.982**	0.958**	0.998**	0.998**	1.000						
Lipase	-0.974**	-0.995**	0.879*	-0.994**	0.968**	0.944**	0.991**	0.995**	0.992**	1.000					
Protease	-0.950**	-0.988**	0.819*	-0.987**	0.962**	0.917*	0.980**	0.988**	0.979**	0.993**	1.000				
DPPH	-0.968**	-0.996**	0.852*	-0.996**	0.982**	0.937**	0.992**	0.997**	0.989**	0.994**	0.996**	1.000			
ABTS	-0.975**	-1.000**	0.884*	-1.000**	0.985**	0.949**	0.998**	1.000**	0.998**	0.996**	0.988**	0.996**	1.000		
Number of active yeast	-0.975**	-1.000**	0.881*	-1.000**	0.985**	0.946**	0.998**	1.000**	0.997**	0.996**	0.990**	0.997**	1.000**	1.000	
Number of active lactobacilli	-0.975**	-1.000**	0.879*	-1.000**	0.987**	0.951**	0.998**	1.000**	0.998**	0.993**	0.986**	0.995**	0.999**	0.999**	1.000

\*:  $P < 0.05$ , \*\*:  $P < 0.01$ .



关( $P<0.01$ )。这说明,在发酵过程中酵母菌可以提高生物活性物质的含量、功效酶和抗氧化能力,李凡<sup>[12]</sup>的研究也表明酵母菌可以提高酵素中的功效酶含量。乳酸菌活菌数和总酚、总黄酮、抗坏血酸、MK、功效酶、抗氧化能力以及酵母菌活菌数呈极显著正相关( $P<0.01$ ),和总糖、可溶性固形物呈极显著负相关( $P<0.01$ ),因此可以确定乳酸菌活菌数在发酵过程中起着很重要的作用,它不仅改变风味物质,还可以提高功效酶的含量<sup>[38]</sup>,从而进一步提高抗氧化能力。MK作为红曲霉特有的产物, MK的含量与酵母菌活菌数和乳酸菌活菌数具有极显著相关性( $P<0.01$ )。这说明在发酵过程中红曲霉的代谢产物可以促进酵母菌和乳酸菌的生长。

### 3 结论

对4种发酵液行了对比分析,发现沙棘酵素、沙棘青稞酵素和沙棘红曲青稞酵素3种酵素都有较高的功效酶、抗氧化性和微生物活菌数,但沙棘酵素、沙青酵素和沙青红曲酵素活性物质含量具有明显的差异。相较于对照组,沙青红曲组具有更高的抗氧化能力、生物活性物质和功效酶。其中沙棘组和沙青组的含量较为接近,这说明添加青稞不会提高酵素的功效性。沙青红曲组酵素的抗氧化能力、生物活性物质、功效酶和微生物活菌数显著高于沙青组酵素( $P<0.05$ ),因此可以证明红曲霉可以促进沙青青稞酵素的发酵并提高其营养物质。根据相关性分析结果可以看出,功效酶活力、抗氧化能力与微生物的活菌数具有一定的相关性,从而进一步证明红曲霉在发酵过程中起着重要的作用。目前市场上酵素研究局限于原料的选择,很少有人能够在菌种的选择上有所创新。此外,红曲霉还可以产生MK,进一步丰富了酵素的生物活性物质。从而证明红曲霉应用到酵素领

域是具有一定的可行性。综上所述,对红曲霉在沙棘青稞酵素中的应用进行研究,可以为酵素行业的发展提供新的思路。

### 参考文献

- [1] 吕旭聪,翁星,韩妙坤,张雯,饶平凡,倪莉. 福建红曲中红曲菌的分离鉴定及菌株特性研究. *中国食品学报*, 2012, 12(2): 88–97.  
Lv XC, Weng X, Han MK, Zhang W, Rao PF, Ni L. Identification and characterization of *Monascus* sp. from Fujian Hongqu. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2012, 12(2): 88–97. (in Chinese)
- [2] 吴玉峰. 高产洛伐他汀红曲菌的选育及其在黄酒中的应用研究. 江南大学硕士学位论文, 2021.
- [3] Fabre CE, Santerre AL, Loret MO, Baberian R, Pareilleux A, Goma G, Blanc PJ. Production and food applications of the red pigments of *Monascus ruber*. *Journal of Food Science*, 1993, 58(5): 1099–1102.
- [4] 孟祥勇,沈赤,毛健,姬中伟. 黄酒多糖的分离纯化及理化性质研究. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(10): 1029–1035.  
Meng XY, Shen C, Mao J, Ji ZW. Isolation, purification and physicochemical properties of polysaccharides from Chinese rice wine. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2017, 36(10): 1029–1035. (in Chinese)
- [5] Lv XC, Huang XL, Zhang W, Rao PF, Ni L. Yeast diversity of traditional alcohol fermentation starters for Hong Qu glutinous rice wine brewing, revealed by culture-dependent and culture-independent methods. *Food Control*, 2013, 34(1): 183–190.
- [6] 刘加友,王振斌. 微生物酵素食品研究进展. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 273–276.  
Liu JY, Wang ZB. Research progress on microbial ferment food. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(1): 273–276. (in Chinese)
- [7] 刘勇,廉永善,王颖莉,李旻辉,肖培根. 沙棘的研究开发评述及其重要意义. *中国中药杂志*, 2014, 39(9): 1547–1552.  
Liu Y, Lian YS, Wang YL, Li MH, Xiao PG. Review of research and development and significant effect of *Hippophae rhamnoides*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, 39(9): 1547–1552. (in Chinese)
- [8] Moza J, Gujral HS. Starch digestibility and bioactivity of high altitude hullless barley. *Food Chemistry*, 2016,

- 194: 561–568.
- [9] 韩宗元, 李晓静, 叶丰, 姜琦, 韩齐, 胡巧巧, 肖志刚. 固态酵素食品的研究进展. *食品与发酵工业*, 2018, 44(9): 294–299.  
Han ZY, Li XJ, Ye F, Jiang Q, Han Q, Hu QQ, Xiao ZG. Development of solid fermented food. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(9): 294–299. (in Chinese)
- [10] Corrêa RCG, Haminiuk CWI, Barros L, Dias MI, Calhelha RC, Kato CG, Correa VG, Peralta RM, Ferreira ICFR. Stability and biological activity of Merlot (*Vitis vinifera*) grape pomace phytochemicals after simulated *in vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation. *Journal of Functional Foods*, 2017, 36: 410–417.
- [11] Zhao GP, Li YQ, Yang J, Cui KY. Antibacterial characteristics of orange pigment extracted from *Monascus* pigments against *Escherichia coli*. *Czech Journal of Food Sciences*, 2016, 34(3): 197–203.
- [12] 李凡. 滨海白首乌酵素的制备及其功效性研究. 江南大学硕士学位论文, 2019.
- [13] 张琪, 朱丹, 牛广财, 颜飞翔, 魏文毅, 朱磊, 王思溥. 高通量测序分析沙棘酵素自然发酵过程中细菌多样性. *食品科学*, 2022, 43(8): 158–165.  
Zhang Q, Zhu D, Niu GC, Yan FX, Wei WY, Zhu L, Wang SP. Bacterial diversity analysis during natural fermentation of sea buckthorn jiaosu by high-throughput sequencing. *Food Science*, 2022, 43(8): 158–165. (in Chinese)
- [14] 余思洁, Oh Young Joo, 李洪军, Kim Tae Suk, 贺稚非, Lee Sang Yun, 李少博, 李敏涵. 液态与固态酵素理化成分及抗氧化活性的研究. *食品与发酵工业*, 2020, 46(13): 85–91.  
Yu SJ, Joo Oy, Li HJ, Suk KT, He ZF, Yun LS, Li SB, Li MH. Physicochemical components and antioxidant activity of liquid and solid Jiaosu. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(13): 85–91. (in Chinese)
- [15] 崔鑫. 无梗五加酵素活性成分及抗氧化能力初步研究. 沈阳农业大学硕士学位论文, 2019.
- [16] 孟想, 朱雪洋, 张莉方, 陶谨, 徐宁莉, 张国强. 萌发处理对黑青稞活性成分组成及抗氧化能力的影响. *食品与发酵工业*, 2022, 48(4): 158–164.  
Meng X, Zhu XY, Zhang LF, Tao J, Xu NL, Zhang GQ. Effect of germination on the composition of active ingredients and antioxidant capacity in black highland barley. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(4): 158–164. (in Chinese)
- [17] Kim SJ. Changes in approximate composition, antioxidant activity and melatonin content of rapeseed during germination. *Korean Journal of Food Preservation*, 2016, 23(6): 839–847.
- [18] 李凤梅. 食品微生物检验. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [19] 毛继龙, 张建辉, 王璨, 赵芑, 陈文静, 邱忠平. 一株高产洛伐他汀红曲霉的筛选与液态发酵条件优化. *微生物学通报*, 2022, 3: 22.  
Mao JL, Zhang JH, Wang C, Zhao F, Chen WJ, Qiu ZP. Screening and liquid fermentation condition optimization of a high lovastatin producing *Monascus*. *Microbiology China*, 2022, 3: 22. (in Chinese)
- [20] 蔡琪琪. 红曲霉在红曲黄酒酿造过程中的作用研究. 福州大学硕士学位论文, 2015.
- [21] 刘凡, 周新虎, 陈翔, 陈坚, 堵国成, 方芳. 洋河浓香型白酒发酵过程酒醅微生物群落结构解析及其与有机酸合成的相关性. *微生物学报*, 2018, 58(12): 2087–2099.  
Liu F, Zhou XH, Chen X, Chen J, Du GC, Fang F. Microbial community of fermented grains and its correlation with organic acids biosynthesis during Yanghe strong-aroma liquor manufacturing process. *Acta Microbiologica Sinica*, 2018, 58(12): 2087–2099. (in Chinese)
- [22] 陈小伟, 程勇杰, 蒋立新, 崔艳丽, 毛建卫, 沙如意. 草莓酵素发酵过程中代谢产物及抗氧化性的变化研究. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 157–165.  
Chen XW, Cheng YJ, Jiang LX, Cui YL, Mao JW, Sha RY. Studies on the changes of metabolites and antioxidant activity during the fermentation process of strawberry Jiaosu. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(5): 157–165. (in Chinese)
- [23] 陆方菊. 红曲米酒曲及米糠改善红曲酒发酵理化指标及其抗氧化活性. 华南理工大学硕士学位论文, 2019.
- [24] Chu SC, Chen C. Effects of origins and fermentation time on the antioxidant activities of kombucha. *Food Chemistry*, 2006, 98(3): 502–507.
- [25] Ghosh K, Ray M, Adak A, Halder SK, Das A, Jana A, Parua MS, Vágvölgyi C, Das Mohapatra PK, Pati BR, Mondal KC. Role of probiotic *Lactobacillus fermentum* KKL1 in the preparation of a rice based fermented beverage. *Bioresource Technology*, 2015, 188: 161–168.
- [26] 赵文红, 莫依灿, 洪泽淳, 吴湖莲, 黄敏欣, 李斌. 红曲对广东客家黄酒抗氧化活性的影响. *现代食品*

- 科技, 2016, 32(1): 143–150.
- Zhao WH, Mo YC, Hong ZC, Wu HL, Huang MX, Li B. Effect of red koji on the antioxidant properties of Guangdong Hakka rice wine. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(1): 143–150. (in Chinese)
- [27] 崔梦情. 真菌固态发酵释放葡萄籽多酚及其机制研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 2021.
- [28] 陈树俊, 郑婕. 响应面优化开菲尔粒发酵复合果蔬汁工艺及体外消化特性分析. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 150–158.
- Chen SJ, Zheng J. Optimization of compound fruit and vegetable juice fermentation with kefir grain by response surface and analysis of digestion characteristics *in vitro*. *Food Research and Development*, 2020, 41(3): 150–158. (in Chinese)
- [29] Ma ZY, Ma Y, Sun XL, Ye YP, Shen BZ, Chen XY, Ito Y. Purification of optical imaging ligand-Cybesin by high-speed counter-current chromatography. *Journal of Chromatography B*, 2010, 878(29): 3039–3043.
- [30] 赵毅, 霍俊伟, 辛秀兰, 秦栋, 陈亮, 张强. 蓝果忍冬果实中主要糖酸组分的高效液相色谱法测定. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(6): 937–942.
- Zhao Y, Huo JW, Xin XL, Qin D, Chen L, Zhang Q. HPLC analysis of the major components of sugars and organic acids in blue honeysuckle fruits. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2015, 42(6): 937–942. (in Chinese)
- [31] Yang CW, Mousa SA. The effect of red yeast rice (*Monascus purpureus*) in dyslipidemia and other disorders. *Complementary Therapies in Medicine*, 2012, 20(6): 466–474.
- [32] 赵治巧, 曾莉, 万玉军, 王刚, 唐自钟, 布同良, 陈惠, 罗丽娟. 酵母菌-植物乳杆菌复合发酵菠萝酵素生物活性的初步研究. *食品与发酵工业*, 2020, 46(7): 110–115.
- Zhao ZQ, Zeng L, Wan YJ, Wang G, Tang ZZ, Bu TL, Chen H, Luo LJ. Study on the bioactivity of pineapple jiaosu fermented by yeast and *Lactobacillus plantarum*. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(7): 110–115. (in Chinese)
- [33] 秦宇蒙, 王艳丽, 周笑犁, 董平坤, 吴栋斐. 番茄酵素自然发酵过程中主要功效酶的变化. *食品工业科技*, 2022, 4: 20.
- Qin YM, Wang YL, Zhou XL, Dong PZ, Wu DF. The changes of main functional enzymes during natural fermentation of tomato enzyme. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 4: 20. (in Chinese)
- [34] Carillon J, del Rio D, Teissèdre PL, Cristol JP, Lacan D, Rouanet JM. Antioxidant capacity and angiotensin I converting enzyme inhibitory activity of a melon concentrate rich in superoxide dismutase. *Food Chemistry*, 2012, 135(3): 1298–1302.
- [35] 徐文流, 贝琦, 梁诗雅, 张敬媛, 吴振强. 红曲霉发酵提高金银花的抗氧化活性. *现代食品科技*, 2020, 36(9): 47–53, 163.
- Xu WL, Bei Q, Liang SY, Zhang JY, Wu ZQ. Improvement of the antioxidative activities of *Flos Ionicerae japonicae* through its solid-state fermentation with *Monascus*. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 47–53, 163. (in Chinese)
- [36] 蒋沅岐, 董玉洁, 周福军, 陈金鹏, 周钰通, 田成旺, 陈常青. 红曲的化学成分、药理作用及临床应用研究进展. *中草药*, 2021, 52(23): 7379–7388.
- Jiang YQ, Dong YJ, Zhou FJ, Chen JP, Zhou YT, Tian CW, Chen CQ. Research progress on chemical constituents, pharmacological action and clinical application of *Fermentum Rubrum*. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(23): 7379–7388. (in Chinese)
- [37] 车逸心, 刘雯娴, 徐瑞欣, 王琦, 杨冬梅, 余淼, 尹胜. 紫红曲霉与酿酒酵母共发酵对红曲甜米酒风味的影响. *中国食品学报*, 2020, 20(4): 118–124.
- Che YX, Liu WX, Xu RX, Wang Q, Yang DM, Yu M, Yin S. Influence of *Monascus purpureus* and *Saccharomyces cerevisiae* co-fermentation on the flavor of sweet red yeast rice wine. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(4): 118–124. (in Chinese)
- [38] 梁鑫, 陈思雨, 赵育, 雷钰, 孔倩倩, 万欣, 张宝善. 乳酸菌和酵母菌发酵红枣汁工艺优化及成分分析. *食品与发酵工业*, 2021, 47(7): 175–182.
- Liang X, Chen SY, Zhao Y, Lei Y, Kong QQ, Wan X, Zhang BS. Process optimization and composition analysis of jujube juice fermentation by lactic acid bacteria and yeast. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(7): 175–182. (in Chinese)