DOI:10.12441/spyswjs.20251027001 [文章编号] 1673-1689(2026)04-0074-11

红薯康普茶发酵工艺优化及其抗氧化活性

唐性杨[1,2] 王 菁[1,3] 林思敏[3] 钱雪芹[1] 阮 晖[1,2*]

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,浙江 杭州 310058; 2. 浙江省食用农产品资源挖掘与高值利用重点实验室,浙江 杭州 310058; 3. 珀莱雅化妆品股份有限公司,浙江 杭州 310023)

摘要:【目的】探究红薯康普茶(kombucha)的最佳发酵工艺,分析其功能成分变化和产品体外抗氧化活性。**【方法】**采用木糖驹形氏杆菌(*Acetobacter xylinus*)、拜耳接合酵母(*Zygosaccharomyces bailii*)和植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)构建纯菌复合发酵体系,利用单因素试验及响应面试验优化发酵工艺,并通过测定理化指标、功能成分和体外抗氧化活性,来评估纯菌复合发酵的增效作用。**【结果】**最佳发酵工艺为:菌种体积比2∶1∶1、发酵温度31.1 ℃、发酵时间32 h、接种体积分数6.8%。在该条件下,红薯康普茶的总酚和总黄酮质量浓度分别为325.68 μg/mL和99.61 μg/mL,较发酵前显著提升1.14倍和1.42倍;DPPH、$ABTS^+$和羟自由基清除能力分别为2.21、10.08、8.30 μmol/mL,较发酵前均有显著提升,其中羟自由基清除能力增幅最大。**【结论】**纯菌复合发酵能有效提升红薯康普茶的功能成分质量浓度与抗氧化活性,为红薯高值化利用及新型康普茶产品开发提供数据支撑。

关键词:红薯;康普茶;纯菌复合发酵

Fermentation Process Optimization and Antioxidant Activity of Sweet Potato Kombucha

TANG Xingyang[1,2] *WANG Jing*[1,3] *LIN Simin*[3] *QIAN Xueqin*[1] *RUAN Hui*[1,2*]

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Agri-food Resources and High-value Utilization, Hangzhou 310058, China; 3. Proya Cosmetics Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to determine the optimal fermentation conditions for sweet potato kombucha and analyze changes in functional components and *in vitro* antioxidant activity of the product. [**Method**] Defined-strains-mixed fermentation was implemented with a consortium composed of *Acetobacter xylinus*, *Zygosaccharomyces bailii*, and *Lactiplantibacillus plantarum*. Single factor experiment and response surface methodology were employed to optimize the fermentation process. Physicochemical indices, functional components, and *in vitro* antioxidant activity were determined to evaluate the enhancement effects of defined-strains-mixed fermentation. [**Result**] The optimum fermentation process: fermentation with a strain volume ratio of 2∶1∶1 and an inoculum volume fraction of 6.8% at 31.1 ℃ for 32 h. The total phenol mass concentration of 325.68 μg/mL and total flavonoid mass concentration of 99.61 μg/mL, representing 1.14-fold and 1.42-fold increases over the pre-fermentation levels, respectively. The DPPH, $ABTS^+$, and hydroxyl radical scavenging activities reached 2.21 μmol/mL, 10.08 μmol/mL, and 8.30 μmol/mL, respectively, all of which were significantly enhanced compared with the pre-fermentation levels, with the hydroxyl radical scavenging activity showing the greatest increase. [**Conclusion**] Defined-strains-mixed fermentation effectively elevates the mass concentrations of functional components and antioxidant capacity in sweet potato kombucha. This study provides data support for the

基金项目:青海省“引才聚才555计划”项目(宁人才字[2023]-1号)。

通信作者:阮晖(1968—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事功能微生物发酵与功效组学解析研究。E-mail:andrewhruan@zju.edu.cn

收稿日期:2025-10-27 **修回日期:**2025-11-28

value-added utilization of sweet potato resources and the development of novel kombucha products.
Keywords: sweet potato; kombucha; defined-strains-mixed fermentation

红薯是我国主要的粮食作物之一，其种植面积和总产量长期居世界首位。红薯营养丰富，富含多种天然营养成分，如维生素C、β-胡萝卜素、叶酸、酚酸、类黄酮及矿物质等，具有抗氧化、抗衰老、提高免疫力等功效[1]。但目前红薯加工主要集中在淀粉制品，附加值低，开发利用程度不足，未能充分体现其营养和经济价值。红薯制品的开发在国外已取得许多成果，如日本用红薯生产出无需添加果汁的饮料，不仅口感良好、色泽鲜艳，而且营养价值丰富；此外，日本的烧酒主要由红薯制成，具有醇甜、柔和、余味清爽等特点，还能够促进血液循环和溶解血栓[2]。国内有关红薯的研究也逐渐增多，尤洁等[3]采用松针和红薯酿造出具有松针草本香气的红薯糯米酒；贺磊[4]用山药和红薯制备出一款新型红薯山药复合果蔬饮料。因此，以红薯为原料生产出对人体健康有益的功能性饮料，能够有效提高红薯的利用价值，具有广阔的市场前景。

康普茶是由细菌与酵母共生体系（symbiotic culture of bacteria and yeasts，SCOBY）发酵茶叶糖水制得的一种低乙醇或不含乙醇的饮品，其酸甜可口，具有促进消化、改善胃肠功能等作用[5-9]。康普茶的品质受多个因素影响，包括糖源、茶叶种类、SCOBY来源、发酵时间和温度等[10-11]。传统康普茶通常以红茶或绿茶为基质、以蔗糖为碳源，这限制了康普茶成分和功能上的多样性，目前已有研究者尝试引入水果[12-14]、谷物[15]和药食同源原料[16]作为发酵底物，拓展了康普茶的原料来源。传统康普茶主要依赖天然SCOBY发酵，导致发酵周期长、菌群复杂、产品稳定性差，存在安全隐患。近年来有研究者利用纯菌发酵开发新型康普茶发酵工艺，如Chen等[17]使用多种醋酸菌和酵母菌，以不同的菌种组合进行纯菌复合发酵生产康普茶；Fabricio等[18]利用食蔗糖驹形氏杆菌（*Komagataeibacter saccharivorans*）、异酒香酵母（*Brettanomyces anomala*）和马克斯克鲁维酵母（*Kluyveromyces marxianus*）进行发酵，研发出一款新的功能型康普茶饮品。

目前国内已有关于康普茶发酵饮料的研究[19-20]，但市场上尚未出现以薯类为原料的康普茶发酵饮料。为了提高康普茶发酵饮料的安全性和规范性，基于作者所在课题组对传统康普茶菌群分析的前期成果及相关文献报道，作者以木糖驹形氏杆菌、拜耳接合酵母、植物乳植杆菌3种菌种构建一种以纯菌复合发酵策略为基础的新型康普茶发酵体系，并以红薯与红茶为主要原料，通过单因素试验及响应面试验确定最佳发酵工艺，并对其理化和抗氧化特性进行研究，为红薯资源的高值化利用与康普茶饮料的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红薯：市售；木糖驹形氏杆菌、植物乳植杆菌：作者所在实验室保藏；拜耳接合酵母：中国工业微生物菌种保藏管理中心；红茶：黄山王光熙松萝茶业股份公司。

中温α-淀粉酶（10 000 U/g）、糖化酶（100 000 U/g）、没食子酸标准品（纯度≥98%）：北京索莱宝科技有限公司；酵母膏、蛋白胨、琼脂、葡萄糖、无水乙醇、苯酚、硫酸、氢氧化钠、碳酸钠、福林酚、亚硝酸钠、硝酸铝、*L*-抗坏血酸、水杨酸、过氧化氢（纯度≥30%）：国药集团化学试剂有限公司；MRS肉汤、MRS琼脂：BR，杭州微生物试剂有限公司；芦丁标准品（纯度≥8%）：上海源叶生物科技有限公司；DPPH（纯度≥98%）：上海麦克林生化科技有限公司；无水三氯化铁（纯度≥99.9%）、三氯乙酸（纯度≥99%）：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；PBS（pH 7.2~7.4）、总抗氧化能力（T-AOC）检测试剂盒（ABTS微板法）：北京兰杰柯科技有限公司。

1.2 仪器与设备

恒温水浴锅：HB 10型，德国IKA公司；高压灭菌锅：MLS-3751L-PC型，日本Panasonic公司；超净工作台：SW-CJ-2FD型，苏州安泰空气技术有限公司；恒温摇床：ZHWY-2102型，上海天呈实验仪器制造有限公司；恒温培养箱：CTHI-250B型，施都凯仪器设备（上海）有限公司；高速离心机：LG10-2.4A型，湘仪离心机仪器有限公司；全波长酶标仪：Mutiskan GO型，美国Thermo Fisher Scientific公司；糖度计：PAL-1型，日本爱宕科学仪器有限公司；pH计：ST3100型，美国OHAUS公司。

1.3 方法

1.3.1 菌株的活化

取−80 ℃保藏的菌种，分别在灭菌后的固体培养基划线活化后得到活化1代，挑取单菌落至液体培养基中扩大培养（拜耳接合酵母100 r/min振荡培养；木糖驹形氏杆菌200 r/min振荡培养；植物乳植杆菌静置培养），得到活化2代。重复平板划

线和液体培养，得到活化3代。之后将固体培养基置于4 ℃保藏备用。

1.3.2 红薯糖化液的制备

根据前期研究建立的最佳酶解工艺，将红薯清洗去皮，去除两端的粗纤维部分，并切成1~2 cm厚的薯片于沸水中热烫6 min，热烫完成后以1 g∶2 mL的料液比进行榨汁，制得红薯浆。在红薯浆中加入8 U/g中温α-淀粉酶，70 ℃水浴下保温30 min，然后迅速降温至60 ℃，调节pH为4.5，加入80 U/g糖化酶，60 ℃保温40 min，然后加热至沸，灭酶10 min，经4层纱布过滤后，分装至250 mL玻璃发酵瓶中，每瓶80 mL，85 ℃水浴灭菌15 min，冷却至40 ℃以下备用。

1.3.3 红薯康普茶的制备

在纯水中添加30 g/L红茶叶，煮沸后浸提10 min，制得茶叶浸提汁，经8层纱布过滤后，分装至250 mL玻璃发酵瓶中，每瓶120 mL，高压121 ℃灭菌20 min。将冷却的红薯糖化液与红茶浸提液按体积比2∶1混合得到发酵基质。各菌株培养至对数生长期后按比例接入发酵基质，发酵瓶用4层纱布封口，置于恒温培养箱中静置发酵。

1.3.4 发酵菌种体积比优化

培养至对数生长期的种子液按接种体积分数6%接种至发酵基质中。控制发酵温度为30 ℃，发酵时间为24 h，木糖驹形氏杆菌、拜耳接合酵母、植物乳植杆菌体积比分别设置为2∶1∶1、5∶1∶1、8∶1∶1、5∶2∶1、5∶1∶2、5∶3∶1、5∶1∶3，根据式(1)计算发酵液综合评分，筛选出最佳菌种体积比。

$$Y = W \times 100 \times 0.3 + S \times 0.7 \quad (1)$$

式中：

Y——综合评分，分；

W——总糖利用率，%；

S——感官评分，分。

1.3.5 红薯康普茶发酵工艺优化

基于1.3.4筛选出的最佳菌种体积比，进行单因素试验。

1)发酵温度：发酵时间为24 h、接种体积分数6%，控制发酵温度分别为28、30、32、34 ℃，以综合评分为响应值，探究发酵温度对红薯康普茶发酵的影响。

2)发酵时间：发酵温度为30 ℃、接种体积分数为6%，控制发酵时间分别为12、24、36、48 h，以综合评分为响应值，探究发酵时间对红薯康普茶发酵的影响。

3)接种体积分数：发酵温度为30 ℃、发酵时间为24 h，控制接种体积分数分别为4%、6%、8%、10%，以综合评分为响应值，探究接种体积分数对红薯康普茶发酵的影响。

在单因素试验的基础上，根据Box-behnken试验设计原理，设计三因素三水平的响应面试验。

1.4 检测方法

1.4.1 理化品质指标测定

1)总糖质量浓度与总糖利用率测定：采用苯酚-硫酸法[21]测定总糖质量浓度。分别取0.1 mg/mL葡萄糖标准溶液0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 mL置于10 mL比色管中，加水至1.0 mL，加入1.0 mL 60 mg/mL苯酚和5.0 mL硫酸，室温静置45 min，测定OD_{490}，绘制标准曲线。取离心后的样品上清液，稀释1 000倍代替葡萄糖标准溶液，重复上述步骤测定OD_{490}，代入标准曲线计算发酵前后总糖质量浓度，根据式(2)计算发酵前后总糖利用率。

$$W = (1 - \frac{m_1}{m_0}) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

W——总糖利用率，%；

m_0——发酵前总糖质量浓度，mg/mL；

m_1——发酵后总糖质量浓度，mg/mL。

2)可溶性固形物测定：样品于4 ℃、10 000 r/min离心15 min后取上清液，采用糖度计进行测定。

3)pH测定：样品于4 ℃、10 000 r/min离心15 min后取上清液，采用pH计进行测定。

4)总酸质量浓度测定：参考GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》，采用酸碱指示剂滴定法测定。

5)总酚质量浓度测定：采用Folin-Ciocalteu法[22]测定总酚质量浓度。分别稀释1 mg/mL没食子酸标准溶液至0、0.005、0.010、0.020、0.050、0.100 mg/mL，分别在各质量浓度标准溶液(1 mL)中加入0.5 mL福林酚溶液，30 ℃保持5 min，加入1.5 mL 100 mg/mL碳酸钠溶液混合均匀，30 ℃避光静置60 min(期间摇动1次)，测定OD_{765}，绘制标准曲线。取离心后样品上清液稀释10倍代替没食子酸标准溶液，重复上述步骤测定OD_{765}，代入标准曲线计算总酚质量浓度。

6)总黄酮质量浓度测定：采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法[23]测定总黄酮质量浓度。分别稀释1 mg/mL芦丁标准溶液至0、0.01、0.05、0.10、0.15、0.20、0.50 mg/mL，在各质量浓度标准溶液(0.5 mL)中加入0.5 mL 50 mg/mL亚硝酸钠溶液，室温静置6 min，加入0.5 mL 100 mg/mL硝酸铝溶

液，室温静置6 min，加入3 mL 40 mg/mL氢氧化钠溶液，室温静置15 min，测定OD_{510}，绘制标准曲线。取离心后的样品上清液，稀释10倍代替芦丁标准溶液，重复上述步骤测定OD_{510}，代入标准曲线计算总黄酮质量浓度。

1.4.2　感官评定

采用盲评小组（n=10）进行感官评定，小组成员为经过感官培训的食品专业人员。评定人员分别从色泽、香气、滋味对康普茶进行感官评分，各项目满分为100分，评价标准见表1。参考徐素云等[24]的方法，按色泽30%、香气30%、滋味40%折合计算得到综合感官评分。

表1　红薯康普茶感官评分标准

Table 1　Sensory scoring standards of sweet potato kombucha

项目	描述	评分/分
色泽	颜色鲜亮，光泽度好，澄清均一	90~100
	颜色较鲜亮，光泽度较好，较澄清均一	70~89
	颜色偏暗，光泽度一般，略浑浊	50~69
	颜色暗沉，无光泽，浑浊或沉淀明显	<50
香气	香气纯正，红薯甜香、茶香与发酵香协调	90~100
	香气较纯正，红薯甜香、茶香与发酵香较协调	70~89
	香气偏淡或偏浓，各类香气协调性一般	50~69
	有酒糟味、霉味、焦糊味或其他异味	<50
滋味	酸甜适中，茶感与红薯甜润感协调，口感细腻顺滑	90~100
	酸甜比例较好，滋味较协调，口感较圆润	70~89
	酸甜比例一般，滋味协调性较差，口感略粗糙	50~69
	过酸或过甜，有明显苦味、涩味或其他异味	<50

1.4.3　体外抗氧化活性测定

1）DPPH自由基清除能力测定：DPPH自由基清除能力测定参考Zhou等[25]的方法并稍加改进。分别稀释4 μmol/mL Trolox标准溶液至0、0.025、0.050、0.075、0.100、0.125 μmol/mL，在各浓度标准溶液（2 mL）中加入2 mL 0.1 mg/mL DPPH-乙醇溶液，室温避光静置30 min，测定OD_{517}。将无水乙醇替代样品和DPPH-乙醇溶液分别作为空白组和对照组，重复上述步骤，测定空白组和对照组的OD_{517}，并按式（3）计算校正后的OD_{517}，绘制标准曲线。取离心（4 ℃、10 000 r/min离心15 min）后发酵上清液样品100 μL，用无水乙醇稀释定容至2 mL代替标准溶液，重复上述步骤测定OD_{517}，代入标准曲线计算DPPH自由基清除能力，单位为μmol/mL，表示1 mL样品的DPPH自由基清除能力所对应的Trolox的物质的量。每组试验平行3次取平均值。

$$\Delta A_0 = A_1 - (A_2 - A_3) \quad (3)$$

式中：

ΔA_0——校正后的OD_{517}；

A_1——空白组的OD_{517}；

A_2——测定组的OD_{517}；

A_3——对照组的OD_{517}。

2）$ABTS^+$自由基清除能力测定：采用总抗氧化能力（T-AOC）检测试剂盒（ABTS微板法）。分别用PBS稀释4 μmol/mL Trolox标准溶液至0、0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 μmol/mL，在96孔板中依次加入10 μL样品和190 μL ABTS工作液，室温避光静置6 min，测定OD_{734}。将PBS替代样品和ABTS工作液分别作为空白组和对照组，重复上述步骤，测定空白组和对照组的OD_{734}，并按式（4）计算校正后的OD_{734}，绘制标准曲线。取离心后样品上清液代替Trolox标准溶液，重复上述步骤测定OD_{734}，代入标准曲线计算$ABTS^+$自由基清除能力，单位为μmol/mL，表示1 mL样品的$ABTS^+$自由基清除能力所对应的Trolox的物质的量。

$$\Delta A_4 = A_5 - (A_6 - A_7) \quad (4)$$

式中：

ΔA_4——校正后的OD_{734}；

A_5——空白组的OD_{734}；

A_6——测定组的OD_{734}；

A_7——对照组的OD_{734}。

3）羟自由基清除能力测定：羟自由基清除能力测定参考王兆石等[26]的方法并稍加改进。分别用去离子水稀释40 μmol/mL *L*-抗坏血酸标准溶液至0、3、4、5、6、8、10 μmol/mL，在各浓度标准溶液（1 mL）中加入9 mmol/L $FeSO_4$溶液、9 mmol/L水杨酸溶液、8.8 mmol/L H_2O_2溶液各1mL，37 ℃水浴30 min，测定OD_{510}。将去离子水替代样品和H_2O_2溶液分别作为空白组和对照组，重复上述步骤，测定空白组和对照组的OD_{510}，并按式（5）计算校正后的OD_{510}，绘制标准曲线。取离心后样品上清液代替*L*-抗坏血酸标准溶液，重复上述步骤测定OD_{510}，代入标准曲线计算羟自由基清除能力，单位为μmol/mL，表示1 mL样品的羟自由基清除能力所对应的*L*-抗坏血酸的物质的量。

$$\Delta A_8 = A_9 - (A_{10} - A_{11}) \quad (5)$$

式中：

ΔA_8——校正后的OD_{510}；

A_9——空白组的OD_{510}；

A_{10}——测定组的OD_{510}；

A_{11}——对照组的OD_{510}。

1.5　数据分析

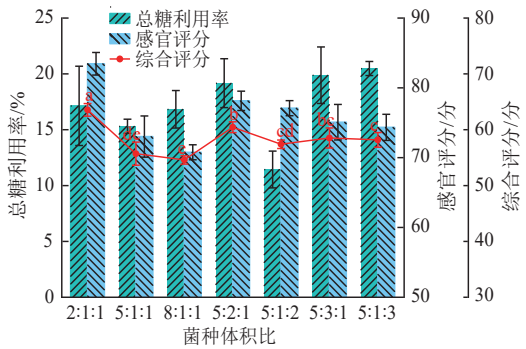
采用Excel 2021进行数据统计，采用Design-Expert 13.0进行响应面设计与分析，采用Origin 2024软件进行差异分析。

2　结果与讨论

2.1　红薯康普茶发酵工艺优化结果

2.1.1　菌种体积比对红薯康普茶发酵的影响

由图1可知，当拜耳接合酵母与植物乳植杆菌体积比不变时，木糖驹形氏杆菌占比越高，发酵制备的红薯康普茶的感官评分和综合评分越低，这可能是由于醋酸菌体积比过高影响体系中微生物间的相互作用，导致酵母菌和乳酸菌的生长状况不佳。当木糖驹形氏杆菌与植物乳植杆菌体积比不变时，随着拜耳接合酵母占比升高，总糖利用率持续上升，可能因其较强的糖底物利用能力及潜在的β-葡萄糖苷酶活性促进了糖向乙醇的转化，随后乙醇被醋酸菌氧化为有机酸，进一步降低总糖质量浓度。当木糖驹形氏杆菌与拜耳接合酵母体积比不变时，随着植物乳植杆菌占比升高，总糖利用率先降后升，感官评分和综合评分先升后降，这可能是由于早期乳酸快速生成，引起酸度上升，对酵母与醋酸菌代谢产生抑制，糖利用不足，但适度乳酸与胞外多糖有助于改善风味；当植物乳植杆菌占比过高时，直接消耗糖并持续生成乳酸，使总糖利用率回升，但过高的酸度会影响感官品质，导致感官评分和综合评分下降。在所有菌种体积比中，当木糖驹形氏杆菌、拜耳接合酵母、植物乳植杆菌体积比为2∶1∶1时，综合评分达到最大值，为(63.56±1.13)分，显著高于其他菌种体积比(P<0.05)。因此，选取2∶1∶1作为最佳菌种体积比。



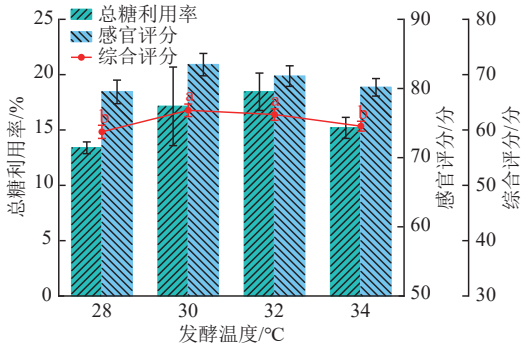
不同字母表示综合评分差异显著(P<0.05)。

图1 菌种体积比对红薯康普茶发酵的影响

Fig. 1　Effects of strain volume ratio on the fermentation of sweet potato kombucha

2.1.2　发酵温度对红薯康普茶发酵的影响

由图2可知，随着发酵温度的升高，红薯康普茶的总糖利用率、感官评分和综合评分均先升高后降低，这可能是由于发酵温度过低时，体系中微生物的生长代谢缓慢，产酸能力弱，而发酵温度过高时，微生物酶失活，不利于风味物质的产生[27]，导致总糖利用率和感官评分降低。当发酵温度为30 ℃和32 ℃时，综合评分显著高于其他温度(P<0.05)。因此，选取30~32 ℃作为响应面优化试验的水平区间。



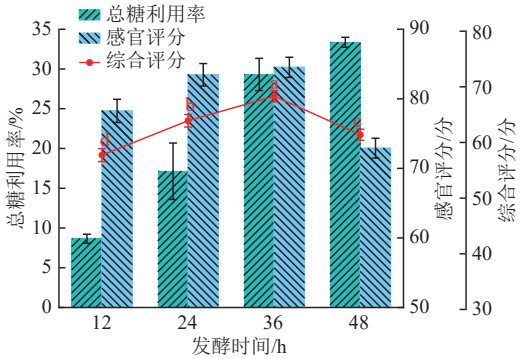
不同字母表示综合评分差异显著(P<0.05)。

图2 发酵温度对红薯康普茶发酵的影响

Fig. 2　Effects of fermentation temperature on the fermentation of sweet potato kombucha

2.1.3　发酵时间对红薯康普茶发酵的影响

由图3可知，随着发酵时间的延长，红薯康普茶的总糖利用率逐渐升高，但后期增速趋缓，这可能与体系中微生物进入衰亡期后自溶率上升和利用葡萄糖产酸能力减弱有关[28]。而感官评分和综合评分均呈先上升后下降的趋势，原因可能是有机酸的积累赋予红薯康普茶酸甜风味，当总酸积累过量时，则会影响感官品质。当发酵时间为24 h和36 h时，综合评分显著高于其他时间(P<0.05)。因此，选取24~36 h作为响应面优化试验的水平区间。



不同字母表示综合评分差异显著(P<0.05)。

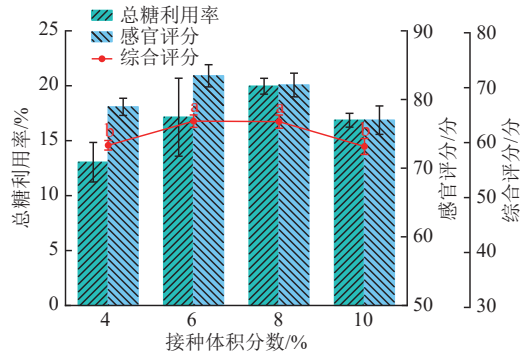
图3 发酵时间对红薯康普茶发酵的影响

Fig. 3　Effects of fermentation time on the fermentation of sweet potato kombucha

2.1.4　接种体积分数对红薯康普茶发酵的影响

醋酸菌、酵母菌、乳酸菌种子液的总接种体积分数会直接影响发酵体系的初始pH以及微生物

初始量。由图4可知，随着接种体积分数的增加，红薯康普茶的总糖利用率、感官评分和综合评分均呈先升高后降低的趋势，这可能是由于接种体积分数较低时，不能充分发酵红薯康普茶产生有机酸，导致总糖利用率、感官评分和综合评分较低；当接种体积分数过高时，可能导致体系中溶氧不足，引起营养缺乏和菌种自溶等，不利于风味产物的积累。当接种体积分数为6%和8%时，综合评分显著高于其他接种体积分数（P<0.05）。因此，选取6%~8%为响应面优化试验的水平区间。



不同字母表示综合评分差异显著（P<0.05）。

图4 接种体积分数对红薯康普茶发酵的影响

Fig. 4　Effects of inoculum volume fraction on the fermentation of sweet potato kombucha

2.2　响应面优化发酵工艺结果

2.2.1　回归方程拟合

根据单因素试验确定的发酵温度（A）、发酵时间（B）以及接种体积分数（C）水平区间，以综合评分（Y）为响应值进行Box-Behnken中心组合试验（三因素三水平），试验因素与水平见表2，试验设计及结果见表3。

表2　红薯康普茶发酵条件优化响应面试验因素与水平

Table 2　Factors and levels of response surface experiments for fermentation condition optimization of sweet potato kombucha

水平	因素		
	发酵温度/℃	发酵时间/h	接种体积分数/%
−1	30	24	6
0	31	30	7
1	32	36	8

2.2.2　方差分析

利用Design Expert 13.0软件对试验结果进行多元二次回归拟合，得到综合评分（Y）的二次多项回归方程为：Y=−2 851.93+186.22A+5.76B−17.03C−0.07AB+0.84AC−0.01BC−3.06A^2−0.06B^2−0.63C^2。

表3　红薯康普茶发酵条件优化响应面试验设计与结果

Table 3　Response surface design and experimental results for fermentation condition optimization of sweet potato kombucha

试验号	发酵温度/℃	发酵时间/h	接种体积分数/%	综合评分/分
1	31	30	7	73.10
2	32	24	7	67.43
3	30	30	8	66.87
4	31	24	8	68.37
5	31	30	7	72.82
6	32	30	6	69.16
7	31	24	6	68.62
8	30	24	7	65.71
9	30	36	7	68.18
10	32	36	7	68.33
11	30	30	6	69.30
12	32	30	8	70.08
13	31	30	7	72.15
14	31	30	7	72.38
15	31	36	8	70.89
16	31	36	6	71.48
17	31	30	7	72.24

方差分析结果见表4，模型的F值为44.77，P<0.000 1，表明模型极显著。失拟项P值为0.343 3，不显著，表明在试验参数范围内模型合理，可用来推测与分析红薯康普茶发酵试验结果。综合评分二次回归方程模型的R^2和R^2_{Adj}分别为0.982 9和0.961 0，说明得到的模型回归效果好，可对结果进行预测分析。

表4　回归模型方差分析

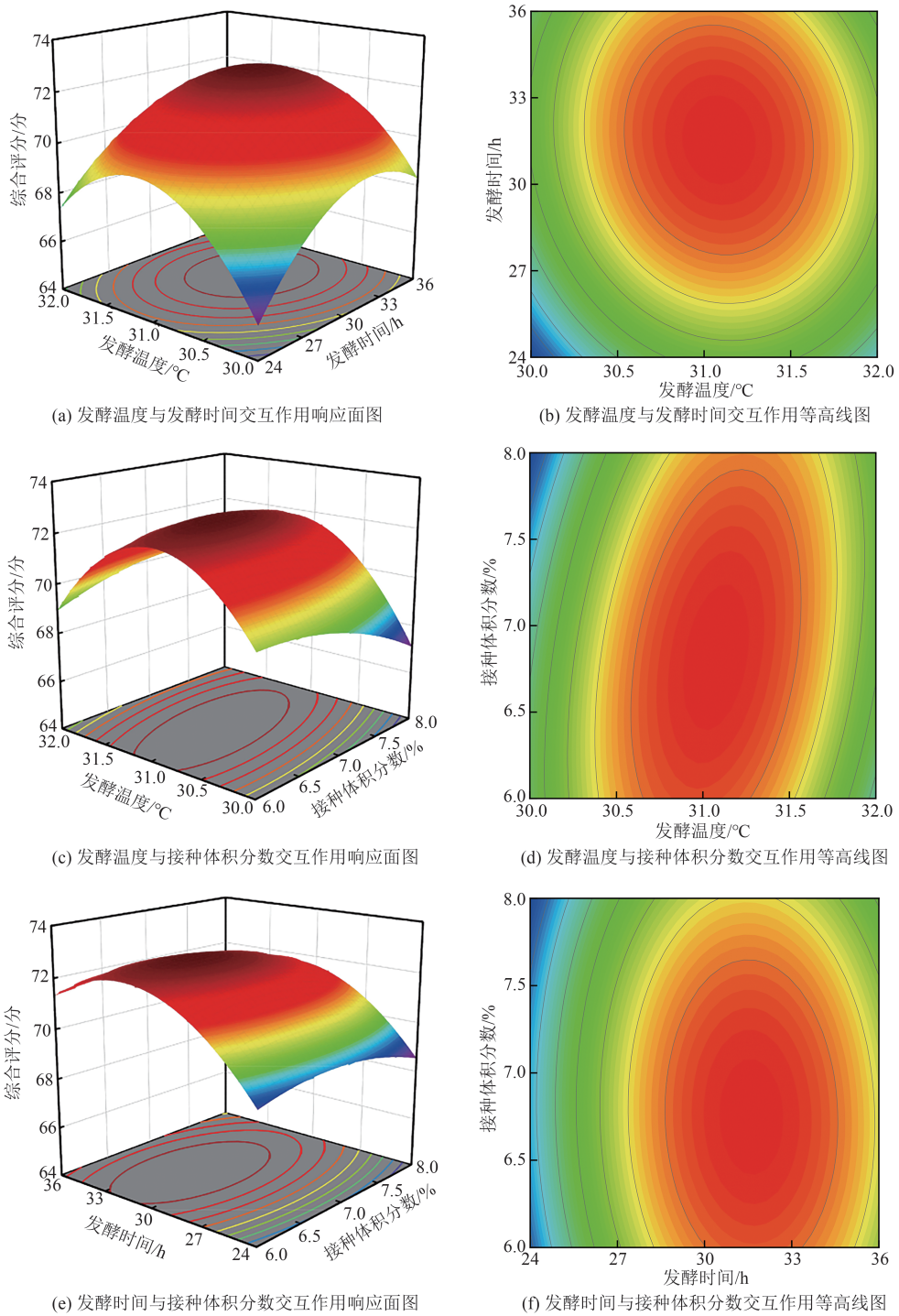
Table 4　Analysis of variance for regression models

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	80.63	9	8.96	44.77	<0.000 1	显著
A	3.05	1	3.05	15.24	0.005 9	
B	9.57	1	9.57	47.82	0.000 2	
C	0.69	1	0.69	3.45	0.105 6	
AB	0.62	1	0.62	3.08	0.122 7	
AC	2.81	1	2.81	14.02	0.007 2	
BC	0.03	1	0.03	0.14	0.715 2	
A^2	39.34	1	39.34	196.56	<0.000 1	
B^2	18.02	1	18.02	90.07	<0.000 1	
C^2	1.67	1	1.67	8.32	0.023 5	
残差	1.40	7	0.20			
失拟项	0.74	3	0.25	1.50	0.343 3	不显著
纯误差	0.66	4	0.16			
总和	82.03	16				

A、B、AC、A^2、B^2的P<0.01，说明这些项对红薯康普茶综合评分的影响极显著；C^2的P<0.05，说明其对红薯康普茶综合评分的影响显著。由F值可知，不同因素对红薯康普茶综合评分的影响顺序为：发酵时间>发酵温度>接种体积分数。

2.2.3　交互作用分析

各因素之间的交互作用可视化结果见图5。响应面呈椭圆形，表明发酵温度和时间两因素间的交互作用较强，曲面坡度陡峭且等高线较为密集，表明交互作用对红薯康普茶发酵的综合评分影响较大。如图5(c)~(d)所示，曲面坡度更加陡峭且等高线更加密集，表明发酵温度和接种体积分数两因素间的交互作用对红薯康普茶发酵的综合评分影响极大。如图5(e)~(f)所示，曲面坡度较缓且等高线较稀疏，表明发酵时间和接种体积分数两因素间的交互作用对红薯康普茶发酵的综合评分影响较小，这与方差分析结果一致。



(a) 发酵温度与发酵时间交互作用响应面图　(b) 发酵温度与发酵时间交互作用等高线图

(c) 发酵温度与接种体积分数交互作用响应面图　(d) 发酵温度与接种体积分数交互作用等高线图

(e) 发酵时间与接种体积分数交互作用响应面图　(f) 发酵时间与接种体积分数交互作用等高线图

图5　各因素间交互作用的响应面及等高线

Fig. 5　Response surface and contour plots of the interactions between factors

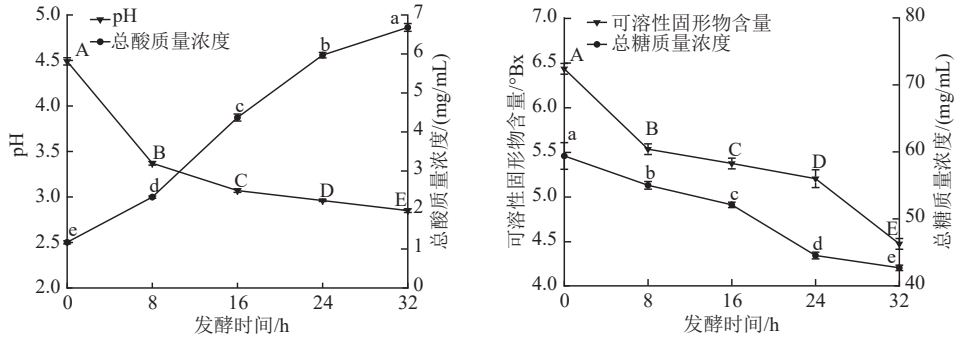
2.2.4　验证试验

经回归方程模型预测，红薯康普茶的最佳发酵工艺参数为：发酵温度31.055 ℃、发酵时间31.581 h、接种体积分数6.786%，预测综合评分为72.731分。为简化实际生产操作，将工艺参数调整为发酵温度31.1 ℃、发酵时间32 h、接种体积分数6.8%，并进行验证试验，重复3次取平均值，得到红薯康普茶综合评分为71.99分，与预期值相比，相对误差为1.02%，说明该响应面优化试验得到的红薯康普茶发酵工艺参数准确可靠。

2.3　红薯康普茶发酵过程中主要成分变化分析

2.3.1　红薯康普茶发酵过程中pH和总糖的变化

由图6可知，随着发酵的进行，红薯康普茶的pH、可溶性固形物含量和总糖质量浓度显著降低（P<0.05），总酸质量浓度显著升高（P<0.05），达到发酵终点时，pH降低至2.85±0.02，总酸质量浓度升高至（6.68±0.10）mg/mL，可溶性固形物含量降低至（4.47±0.06）°Bx，总糖质量浓度降低至（42.69±0.40）mg/mL，这可能是由于酵母菌通过糖酵解途径将葡萄糖代谢成乙醇和二氧化碳，并被醋酸菌和乳酸菌进一步利用转化为有机酸等其他产物[29]，导致pH、可溶性固形物含量和总糖质量浓度降低及总酸质量浓度升高。pH低于2.5的康普茶中含有大量乙酸，可能对人体健康有害[17]，而pH超过4.2时，则会抑制发酵菌种的生长[30]，因此，纯菌复合发酵对红薯康普茶的食用安全性具有积极影响。



(a) pH与总酸质量浓度　　(b) 可溶性固形物含量与总糖质量浓度

不同字母表示同一指标的不同组别间差异显著（P<0.05）。

图6　红薯康普茶发酵过程中pH与总酸质量浓度、可溶性固形物含量与总糖质量浓度的变化

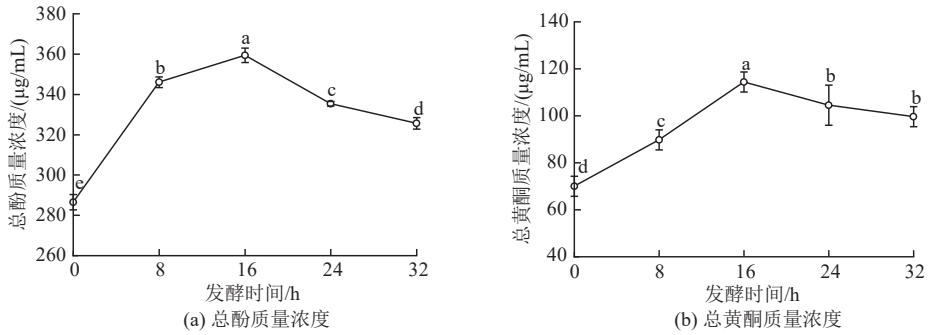
Fig. 6　Changes in pH, total acid mass concentration, soluble solids content, and total sugar mass concentration of sweet potato kombucha during the fermentation process

2.3.2　红薯康普茶发酵过程中总酚和总黄酮的变化

由图7(a)可知，随着发酵的进行，红薯康普茶的总酚质量浓度先上升后下降，发酵16 h时达到最大值，为（359.42±3.61）μg/mL，其原因可能是发酵16 h时发酵液的总糖质量浓度较高，高糖促进酚类在发酵液中溶解，醋酸菌和乳酸菌将多酚复合物降解为单体[31]，导致总酚质量浓度增加，而后发酵产生大量有机酸使体系pH降低，酚类物质在极低pH下发生酸催化降解[32]，导致总酚质量浓度减少。由图7(b)可知，红薯康普茶的总黄酮质量浓度先上升后下降，发酵16 h时达到最大值，为（114.40±4.27）μg/mL，这可能是由于起始阶段酵母菌通过糖酵解途径产生乙醇，使黄酮的溶解量增加[33]，总黄酮质量浓度上升，而发酵后期，红薯康普茶中的有机酸和黄酮类化合物相互作用形成新的且更稳定的酚类衍生物，导致总黄酮质量浓度减少[34]。当发酵到32 h时，红薯康普茶的总酚和总黄酮质量浓度分别达到（325.68±2.90）μg/mL和（99.61±4.27）μg/mL，较发酵前分别提升了1.14倍和1.42倍，说明纯菌复合发酵可有效提升红薯康普茶中的总酚和总黄酮质量浓度。

2.4　抗氧化活性分析

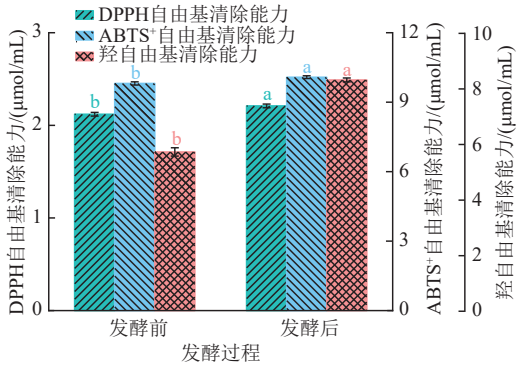
由图8可知，与未发酵样品相比，发酵样品具有较高的抗氧化能力，DPPH、$ABTS^+$和羟自由基清除能力分别较未发酵样品高0.09、0.27、2.59 μmol/mL，差异显著（P<0.05）。这可能是由于红薯康普茶中的大分子多酚被微生物代谢转化为更易发挥清除自由基作用的小分子物质[35]，且有机酸与黄酮类化合物相互作用形成更稳定的酚类衍生物[34]，导致红薯康普茶的抗氧化活性增强。比较DPPH和$ABTS^+$自由基清除能力发现，红薯康普茶清除$ABTS^+$自由基的能力显著高于DPPH自由基（P<0.05），这与Vukić等[36]研究结果一致，原因可能是DPPH更易溶解在有机介质，特别是



不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 7 红薯康普茶发酵过程中总酚质量浓度和总黄酮质量浓度的变化

Fig. 7 Changes in total phenol mass concentration and total flavonoid mass concentration of sweet potato kombucha during the fermentation process



不同字母表示同一指标在不同发酵过程中差异显著(P<0.05)。

图 8 发酵对红薯康普茶抗氧化活性的影响

Fig. 8 Effects of fermentation on antioxidant activity of sweet potato kombucha

乙醇中，导致无法检测到某些蛋白质沉淀的抗氧化活性[37]，而 ABTS 可以溶解在水和有机介质中，从而可以测定亲水性和亲脂性化合物的自由基清除活性[38]。相较于 DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除能力，发酵后红薯康普茶的羟自由基清除能力提升幅度更大，这与王琪等[39]的研究结果一致，原因可能是发酵产生的酚酸类小分子供氢能力更强，对羟自由基更敏感，且发酵产生的有机酸具有金属离子螯合作用[40]，可抑制 Fenton 反应中羟自由基的生成，从而降低底物氧化程度，表现为更高的羟自由基清除活性。因此，纯菌复合发酵可显著增强红薯康普茶的抗氧化能力，尤其是对羟自由基的清除能力。

3 结论

作者采用纯菌复合发酵体系，以红薯和红茶为主要原料，通过单因素试验及响应面试验优化了红薯康普茶的发酵工艺，显著提高了其功能成分水平及抗氧化活性。结果表明，红薯康普茶的最佳发酵条件为：木糖驹形氏杆菌、拜耳接合酵母、植物乳植杆菌体积比 2∶1∶1、发酵温度 31.1 ℃、发酵时间 32 h、接种体积分数 6.8%。在该条件下，红薯康普茶的总酸质量浓度显著升高，pH、可溶性固形物含量和总糖质量浓度显著降低；总酚与总黄酮质量浓度分别显著提升至 325.68 μg/mL 和 99.61 μg/mL，较发酵前分别提升 1.14 倍和 1.42 倍；抗氧化活性显著增强，对 DPPH、$ABTS^+$ 和羟自由基的清除能力分别为 2.21、10.08、8.30 μmol/mL，较发酵前均有显著提升(P<0.05)，其中羟自由基清除能力增幅最为显著。相比于以蔗糖为碳源、依赖 SCOBY 发酵的传统康普茶，本研究拓展了康普茶的原料来源，提出了纯菌复合发酵的新思路，对促进红薯的高值化利用与康普茶产业的发展具有重要意义。未来可进一步探究红薯康普茶的体内抗氧化活性及其作用机制，为红薯康普茶饮料的开发与利用提供参考。

参考文献

[1] 江阳，孙成均. 甘薯的营养成分及其保健功效研究进展[J]. 中国农业科技导报，2010，12(4)：56-61.
JIANG Y，SUN C J. Advances in studies on nutritious components of sweet potato and their health-promoting functions [J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2010，12(4)：56-61.(in Chinese)

[2] 陈燕，李小惠，张惟广. 甘薯酒发酵工艺优化及香气成分分析[J]. 食品科学，2017，38(10)：155-161.
CHEN Y，LI X H，ZHANG W G. Optimization of fermentation of sweet potato wine and analysis of aroma components[J]. Food Science，2017，38(10)：155-161.(in Chinese)

[3] 尤洁，谢茹胜，吴伟斌. 松针红薯糯米酒发酵工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2025，46(4)：185-193.

YOU J，XIE R S，WU W B. Optimization of the fermentation process for pine-needle sweet-potato glutinous rice wine and analysis of its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(4)：185-193.(in Chinese)

[4] 贺磊. 基于响应面法优化的红薯山药饮料研制及红薯中DHEA提取工艺研究[D]. 成都：西南交通大学，2019.

[5] VILLARREAL-SOTO S A，BEAUFORT S，BOUAJILA J，et al. Understanding kombucha tea fermentation：a review[J]. Journal of Food Science，2018，83(3)：580-588.

[6] KAPP J M，SUMNER W. Kombucha：a systematic review of the empirical evidence of human health benefit[J]. Annals of Epidemiology，2019，30：66-70.

[7] BISHOP P，PITTS E R，BUDNER D，et al. Chemical composition of kombucha[J]. Beverages，2022，8(3)：45.

[8] HUANG Y B，ZOU C，GAO Y，et al. Kombucha beverages made from *Camellia nitidissima* Chi and *Camellia sinensis* flowers：physicochemical properties，sensory properties and bioactivity[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science，2024，37：100964.

[9] XIONG R G，ZHOU D D，CHENG J，et al. Preparation and evaluation of liquorice（*Glycyrrhiza uralensis*）and ginger（*Zingiber officinale*）kombucha beverage based on antioxidant capacities，phenolic compounds and sensory qualities[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science，2024，35：100869.

[10] KILMANOGLU H，AKBAS M，YIGIT C A，et al. Kombucha as alternative microbial consortium for sourdough fermentation：bread characterization and investigation of shelf life[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science，2024，35：100903.

[11] ANTOLAK H，PIECHOTA D，KUCHARSKA A. Kombucha tea：a double power of bioactive compounds from tea and symbiotic culture of bacteria and yeasts（SCOBY）[J]. Antioxidants，2021，10(10)：1541.

[12] 张阳阳，吕培楷，姜兴旭，等. 红茶菌发酵猕猴桃果醋的工艺优化及其挥发性成分分析[J]. 粮食与油脂，2024，37(12)：109-115.
ZHANG Y Y，LYU P K，JIANG X X，et al. Process optimization of kiwi fruit vinegar fermented by kombucha and analysis of its volatile components[J]. Cereals & Oils，2024，37(12)：109-115.(in Chinese)

[13] 宋清鹏，胡卓炎，赵雷，等. 龙眼果肉发酵红茶菌饮料[J]. 食品与发酵工业，2014，40(1)：216-221.
SONG Q P，HU Z Y，ZHAO L，et al. Optimization of processing parameters for kombucha fermentation of lon aril[J]. Food and Fermentation Industries，2014，40(1)：216-221.(in Chinese)

[14] DE LIMA A S L，DE MEDEIROS F A T，DE OLIVEIRA P E M，et al. Fermentation of passion fruit leaf tea with kombucha inoculum：an upcycling approach for the development of functional fermented beverages[J]. Food Research International，2025，218：116870.

[15] 徐清萍，金鑫，郭苗苗，等. 红茶菌在谷物原料发酵制醋中的应用[J]. 中国酿造，2019，38(6)：90-95.
XU Q P，JIN X，GUO M M，et al. Application of kombucha in vinegar production by grain raw materials fermentation[J]. China Brewing，2019，38(6)：90-95.(in Chinese)

[16] 冀权，罗正勇，勉海荣，等. 红茶菌发酵枸杞果醋饮料工艺研究与品质分析[J]. 饮料工业，2023，26(5)：41-48.
JI Q，LUO Z Y，MIAN H R，et al. Optimize the process of fermented Goji vinegar with kombucha and conduct quality analysis[J]. Beverage Industry，2023，26(5)：41-48.(in Chinese)

[17] CHEN F I，CHANG Y T，KHOIRUNNIDA F L，et al. The effect of different yeast and bacterial strain combinations on the physicochemical and metabolic profile of kombucha fermentation[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science，2025，42：101296.

[18] FABRICIO M F，VARGAS B K，TISCHER B，et al. Revamping kombucha production：achieving consistency and probiotic potential through a tailor-made microbial consortium[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science，2023，34：100844.

[19] 孙玉坤，李亚霖，赵亮，等. 红茶菌A4发酵功能饮料的研制[J]. 食品与发酵工业，2017，43(2)：147-153.
SUN Y K，LI Y L，ZHAO L，et al. Development on functional fermented beverage with kombucha A4[J]. Food and Fermentation Industries，2017，43(2)：147-153.(in Chinese)

[20] 林娟，叶秀云，曹泽丽，等.“红茶菌”中微生物的分离及纯菌混合发酵生产[J]. 中国食品学报，2015，15(2)：39-48.
LIN J，YE X Y，CAO Z L，et al. Isolation of microbes from kombucha and kombucha fermentation with pure culture combinations[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2015，15(2)：39-48.(in Chinese)

[21] 郑若欣，易啸，罗爽，等. 醇沉-苯酚硫酸法测定桑葚酒中多糖含量[J]. 现代食品，2021，27(9)：154-158.
ZHENG R X，YI X，LUO S，et al. Determination of polysaccharide in mulberry wine by ethanol precipitation-phenol sulfuric acid method[J]. Modern Food，2021，27(9)：154-158.(in Chinese)

[22] 古小露，马媛，耿福能，等. 发酵剂复配对全石榴发酵汁品质的影响[J]. 食品工业科技，2017，38(17)：105-110.
GU X L，MA Y，GENG F N，et al. Effects of vat starters on the quality of pomegranate fermented juice[J]. Science and Technology of Food Industry，2017，38(17)：105-110.(in Chinese)

[23] 胡海洋，肖宇，伍一有，等. 藜麦松露饮料酒发酵过程中感官、理化指标变化及挥发性风味成分分析[J]. 中国酿造，2023，42(11)：254-261.
HU H Y，XIAO Y，WU Y Y，et al. Changes of sensory and physicochemical indicators and analysis of volatile

flavor components during fermentation process of quinoa truffle alcoholic beverage[J]. China Brewing, 2023, 42(11): 254-261.(in Chinese)

[24] 徐素云,王艳萍,周聪,等. 纯种混合发酵红茶菌工艺优化及品质分析[J]. 食品研究与开发,2022,43(15):138-145.
XU S Y, WANG Y P, ZHOU C, et al. Optimization and quality analysis of pure and mixed fermentation of kombucha[J]. Food Research and Development, 2022, 43(15): 138-145.(in Chinese)

[25] ZHOU D, ZHONG J, HUANG Y G, et al. Effect of free and bound polyphenols from *Rosa roxburghii* Tratt distiller's grains on moderating fecal microbiota[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100747.

[26] 王兆石,王召君,董明盛,等. 超分子弹性蛋白的促细胞增殖及抗氧化能力研究[J]. 食品与生物技术学报,2025,44(1):132-142.
WANG Z S, WANG Z J, DONG M S, et al. Cell proliferation-promoting effect and antioxidant capacity of supramolecular elastin[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(1): 132-142.(in Chinese)

[27] 徐家豪,林静嫦,张舒宁,等. 柑橘红茶菌饮料发酵工艺的优化[J]. 现代食品科技,2022,38(4):106-113,274.
XU J H, LIN J C, ZHANG S N, et al. Optimization of fermentation technology of citrus black tea beverage[J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(4): 106-113, 274.(in Chinese)

[28] 李珂,高宁,张飞,等. 模糊数学综合评价结合响应面法优化竹笋汁饮品发酵工艺[J]. 中国酿造,2024,43(6):176-181.
LI K, GAO N, ZHANG F, et al. Optimization of fermentation process of bamboo shoot juice beverage by fuzzy mathematics comprehensive evaluation combined with response surface method[J]. China Brewing, 2024, 43(6): 176-181.(in Chinese)

[29] JAYABALAN R, SUBATHRADEVI P, MARIMUTHU S, et al. Changes in free-radical scavenging ability of kombucha tea during fermentation[J]. Food Chemistry, 2008, 109(1): 227-234.

[30] SALES A L, IRIONDO-DEHOND A, DEPAULA J, et al. Intracellular antioxidant and anti-inflammatory effects and bioactive profiles of coffee cascara and black tea kombucha beverages[J]. Foods, 2023, 12(9): 1905.

[31] OJO A O, DE SMIDT O. Microbial composition, bioactive compounds, potential benefits and risks associated with kombucha: a concise review[J]. Fermentation, 2023, 9(5): 472.

[32] MORALES D, GUTIÉRREZ-PENSADO R, BRAVO F I, et al. Novel kombucha beverages with antioxidant activity based on fruits as alternative substrates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115482.

[33] 赵红宇,陈敦洪,邓良,等. 桑葚果酒全渣发酵过程中生物活性物质及其抗氧化活性变化的研究[J]. 食品工业科技,2015,36(23):182-185,189.
ZHAO H Y, CHEN D H, DENG L, et al. Influence of alcoholic solid-state fermentation process on bioactive constituents and antioxidant activity from mulberries (*Morus nigra* L.)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(23): 182-185, 189.(in Chinese)

[34] JAKUBCZYK K, KAŁDUŃSKA J, KOCHMAN J, et al. Chemical profile and antioxidant activity of the kombucha beverage derived from white, green, black and red tea[J]. Antioxidants, 2020, 9(5): 447.

[35] MFOPA A N, KEMZEU R, FOKOM R, et al. Phenolic compounds, antioxidant and antileishmanial activities of kombucha as affected by fermentation time[J]. Heliyon, 2024, 10(22): e40463.

[36] VUKIĆ D, PAVLIĆ B, VUKIĆ V, et al. Antioxidative capacity of fresh kombucha cheese fortified with sage herbal dust and its preparations[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(6): 2274-2283.

[37] TANG X Y, HE Z Y, DAI Y F, et al. Peptide fractionation and free radical scavenging activity of zein hydrolysate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(1): 587-593.

[38] CHANG C Y, WU K C, CHIANG S H. Antioxidant properties and protein compositions of porcine haemoglobin hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1537-1543.

[39] 王琪,薛润泽,彭佳伟,等. 乳酸菌发酵藜麦和燕麦工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国调味品,2025,50(9):18-28.
WANG Q, XUE R Z, PENG J W, et al. Study on optimization of process and antioxidant activity of quinoa and oats fermented by lactic acid bacteria[J]. China Condiment, 2025, 50(9): 18-28.(in Chinese)

[40] AMADOU I, LE G W, SHI Y H, et al. Reducing, radical scavenging, and chelation properties of fermented soy protein meal hydrolysate by *Lactobacillus plantarum* LP6[J]. International Journal of Food Properties, 2011, 14(3): 654-665.