

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

李珂^{1,2}, 高宁^{1,2}, 张飞^{1,2}, 谭旭^{1,2}, 袁滨锋^{1,2}, 张美云³, 李宗军^{1,2*}

(1.湖南农业大学 食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学 湖南省食品科学与生物技术重点实验室, 湖南 长沙 410128; 3.湖南惊石农业科技有限公司, 湖南 益阳 413400)

摘要: 该研究以清水竹笋罐头生产过程中产生的清水为原料, 以发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*)与红茶菌为菌种复合发酵制备竹笋汁饮品。利用单因素试验、模糊数学综合评价结合响应面法对其发酵工艺进行优化, 并对其理化指标、微生物指标及抗氧化性进行检测分析。结果表明, 竹笋汁饮品的最佳发酵工艺为: 红茶菌添加量6%、发酵温度25℃、发酵时间2.5 d。在此优化条件下, 竹笋汁饮品的色泽均匀, 呈浅黄色的基底液, 其感官评分为85.24分, 固形物含量为6.13 g/L, pH为3.38, 总糖含量为0.16 g/L, 总酸含量为41.33 g/L, 总酚含量为7.74 mg/L, 总黄酮含量为0.066 mg/mL; 益生菌活菌数为 3.5×10^7 CFU/g, 大肠菌群、沙门氏菌及霉菌未检出, 说明其理化指标及微生物指标均符合T/CASME 435—2023《益生菌发酵植物饮料》。竹笋汁饮品对1,1-二苯基-2-苦基胍(DPPH)自由基清除率为64.03%, 羟自由基($\cdot\text{OH}$)清除率为46.62%, 说明其具有一定的抗氧化能力。

关键词: 竹笋汁; 红茶菌; 复合发酵; 模糊数学综合评价; 响应面法; 发酵工艺; 理化指标; 抗氧化性

中图分类号: TS275.4

文章编号: 0254-5071(2024)06-0176-06

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2024.06.027

引文格式: 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.

Optimization of fermentation process of bamboo shoot juice beverage by fuzzy mathematics comprehensive evaluation combined with response surface method

LI Ke^{1,2}, GAO Ning^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2}, TAN Xu^{1,2}, YUAN Binfeng^{1,2}, ZHANG Meiyun³, LI Zongjun^{1,2*}

(1.College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2.Hunan Province Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

3.Hunan Jingshi Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Yiyang 413400, China)

Abstract: Using clear water produced in the process of canned bamboo shoots as raw material, the bamboo shoot juice beverage was prepared with *Lactobacillus fermentum* and Kombucha as strains. The fermentation process was optimized by single factor test, fuzzy mathematics comprehensive evaluation and response surface method, and its physicochemical index, microbial index and antioxidant activity were tested and analyzed. The results showed that the optimal fermentation process for bamboo shoot juice beverage was as follows: Kombucha addition 6%, fermentation temperature 25℃, and time 2.5 d. Under these optimal conditions, the color of bamboo shoot juice beverage was uniform, with light yellow base fluid, the sensory score, solid content, pH, total sugar, total acid, total phenol and total flavonoids contents were 85.24 points, 6.13 g/L, 3.38, 0.16 g/L, 41.33 g/L, 7.74 mg/L and 0.066 mg/ml, respectively. The viable number of probiotics was 3.5×10^7 CFU/g, and coliform, *Salmonella* and mold were not detected, indicating that its physicochemical and microbial indexes were in line with the standard T/CASME 435—2023 "Probiotic fermented botanical beverage". The scavenging rate of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazide (DPPH) free radical and hydroxyl free radical ($\cdot\text{OH}$) of bamboo shoot juice beverage were 64.03% and 46.62%, respectively, indicating that bamboo shoot juice beverage had certain antioxidant capacity.

Key words: bamboo shoot juice; kombucha; composite fermentation; fuzzy mathematics comprehensive evaluation; response surface methodology; fermentation process; physicochemical index; antioxidant property

竹笋主要生长在中国南方, 产自热带和亚热带, 是一种喜温怕冷的植物, 种类繁多, 主要有毛竹、麻竹、雷竹、方竹等^[1]。中国是世界上竹资源丰富的国家, 竹笋产量逐年增加, 约40%的竹笋用于鲜食, 60%的竹笋用于加工^[2-3]。同时现代科学研究结果表明, 竹笋含有丰富的蛋白质、氨基酸、多糖、维生素等化学成分, 营养丰富, 药用价值高, 是一种营养齐全的天然绿色食品^[4]。国内竹笋加工方法繁多, 主要

有水煮、干制、发酵等, 在竹笋加工过程中产生大量副产物, 这些副产物处理不当不仅会严重污染环境, 而且会造成物质的浪费^[5-7]。其中, 在制作清水竹笋罐头加工过程会产生大量的竹笋清水, 这种清水一般会直接丢弃, 但LI K等^[8]研究发现, 通过乳酸菌发酵, 竹笋清水中含有丰富的氨基酸、糖类及其他营养物质, 因此, 利用清水竹笋罐头制备过程中产生的清水进行副产物加工具有重要的意义。

收稿日期: 2023-09-26

修回日期: 2024-01-10

基金项目: 湖南省重点研究计划(2022NK2040)

作者简介: 李珂(1982-), 男, 高级实验师, 博士, 研究方向为食品加工与安全。

*通讯作者: 李宗军(1967-), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品生物技术。

在发酵产品中,较常见的微生物发酵产物为红茶菌,别名为海宝,主要以茶叶(基本以红茶为主,此外还有许多创新原料,如果汁^[9]、牛奶^[10]以及树叶^[11]等)和白砂糖为原料,由醋酸菌和酵母菌等多种微生物发酵1~3周制得的共生菌群结合体^[12]。通过近年来国内外研究表明,红茶菌具有调节血压、改善睡眠、预防治疗糖尿病和高血压等多种保健效果^[13],且在发酵过程中产生了许多生物活性物质,如有机酸、多酚、黄酮、茶多酚等^[14]。这些物质给予红茶菌类食用产品特有的风味和特殊的功能,促进红茶菌类食用产品的开发及其营养功能研究。同时有研究发现,乳酸菌的存在可为红茶菌的发酵提供有益环境^[15],添加乳酸菌的红茶菌饮料,能产生更多的健康有机酸,改善饮料风味,降低刺激酸味^[16],同时提高饮料益生功效,那是否可利用清水竹笋罐头中的清水作为底物进行发酵来制得相关竹笋汁饮品值得探究。

本研究以清水竹笋罐头生产过程中产生的清水为原料,以发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*)与红茶菌为菌种进行复合发酵制备竹笋汁饮品。利用单因素试验、模糊数学综合评价结合响应面法对其发酵工艺进行优化,并对其理化指标及抗氧化性进行检测分析,以期制得一款利用竹笋罐头清水发酵的新型饮品。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料与菌株

清水竹笋罐头清水[蛋白质含量为(0.07±0.02) g/100 g,总糖含量为(0.26±0.13) g/L]:湖南桃江惊石农业科技有限公司;红茶菌(食品级):凤缘祥网店购买;发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*):湖南农业大学14教602课题组提供。

1.1.2 培养基

MRS肉汤(固体)培养基^[17]:广州环凯微生物科技有限公司。

1.1.3 主要试剂

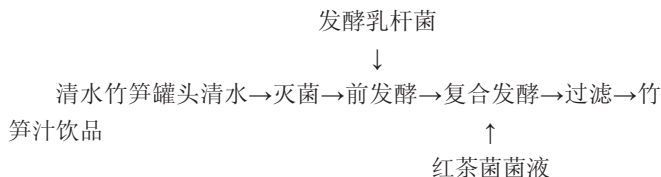
总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)检测试剂盒(比色法):南京建成生物工程所;白砂糖(食品级):云南皇冠园食品有限公司;福林酚、没食子酸、无水乙醇、无水碳酸钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

The Spectra Max ABS Plus酶标仪:美谷分子仪器(上海)有限公司;HNT-2102C摇床:天津欧诺仪器股份有限公司;SPX-25085H-II生化培养箱:上海新苗医疗器械制造有限公司;AE1204电子分析天平:湘仪天平仪器设备有限公司;101-3AB电热鼓风干燥箱:天津市泰斯特仪器有限公司;PHS-3C酸度计:上海雷磁仪器有限公司;DK-S28电热恒温水浴锅:上海精宏实验设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 竹笋汁饮品发酵工艺流程^[18-20]



操作要点:

灭菌:将清水竹笋罐头清水于80℃条件下水浴灭菌20 min。

发酵乳杆菌种子液制备:先将发酵乳杆菌划线接种于MRS固体斜面中,37℃条件下活化12 h,活化完成后将发酵乳杆菌接种于清水中,37℃、180 r/min条件下培养12 h,得到种子液。

发酵乳杆菌清水竹笋罐头上前发酵液的制备:按1%(V/V)的接种量将发酵乳杆菌种子液接种至清水中,37℃条件下发酵12 h。

红茶菌菌液制备:将红茶与水按料水比1:100(g:mL)混合,煮沸15 min,过滤,取茶汤,加入10%白砂糖,煮沸,冷却后加入6%红茶菌,30℃发酵5 d得到红茶菌菌液。

复合发酵:将红茶菌菌液接种至发酵乳杆菌前发酵液中,25℃条件下复合发酵3 d,得到竹笋汁发酵液。

过滤:发酵完成后,取上清液,用8层纱布过滤,得到竹笋汁饮品,于4℃冷藏保存。

1.3.2 竹笋汁饮品发酵工艺优化单因素试验

参考柴丽娜等^[21]的工艺,采用单因素轮换法分别考察红茶菌添加量(3%、6%、9%、12%、15%)、复合发酵温度(20℃、25℃、30℃、35℃、40℃)、复合发酵时间(1 d、2 d、3 d、4 d、5 d)对竹笋汁饮品模糊数学感官评分的影响。

1.3.3 竹笋汁饮品发酵工艺优化响应面试验

在单因素试验的基础上,以红茶菌添加量(A)、复合发酵时间(B)和复合发酵温度(C)为考察因素,模糊数学感官评分(Y)为响应值,采用Design Expert 8.0.6软件设计3因素3水平的Box-Behnken响应面试验^[22-23],试验因素与水平见表1。

表1 竹笋汁饮品发酵工艺优化Box-Behnken试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken tests for bamboo shoot beverage drink fermentation process optimization

因素	水平		
	-1	0	1
A 红茶菌添加量/%	4	6	8
B 复合发酵时间/d	2	3	4
C 复合发酵温度/℃	23	25	27

1.3.4 感官评价

由10名成员组成评定小组,对发酵竹笋汁的口感、外观、色泽和气味4个指标进行感官评定,感官评价标准见表2,饮品感官评分满分为100分^[24]。

表2 竹笋汁饮品的感官评定标准
Table 2 Sensory evaluation standards of bamboo shoot juice beverage

项目	评分标准			
口感 (40分)	酸甜比例均匀,口感细腻 (35~40分)	酸甜比列差 (30~35分)	过于偏酸,且存在少许异味 (25~30分)	醋酸味过重,难以下咽 (<25分)
外观 (30分)	液体较澄清,无生物膜形成,只有稍许杂质 (26~30分)	液体较澄清,瓶底有大量沉淀 (22~26分)	液体浑浊,液体中存在较多沉淀,液面只有纤维状细丝 (18~22分)	液体清亮澄清,无沉淀,只有少量生物膜漂浮 (<18分)
色泽 (10分)	颜色均匀,呈浅红色 (9~10分)	液体较澄清,色浅(7~9分)	颜色较深,整体感觉较差 (5~7分)	颜色深,整体感觉差 (<5分)
气味 (20分)	微酸,有竹笋香味,较为柔和 (18~20分)	酸味较大,气味较协调,可接受 (15~18分)	酸味中掺杂醇味,有刺鼻味道 (12~15分)	气味刺鼻,无竹笋味,醇味较重 (<12分)

1.3.5 模糊数学综合评判

为得到模糊数学评价的总分,划分感官评价等级分值区间为:80~100分为非常满意,60~80分为满意,40~60分为一般,0~40分为不满意,要求评测员做出客观评价,品尝后清水漱口。

建立评判集^[25]:对象集 $U=\{u_1,\cdots,u_i,u_n\}=\{1,2,\cdots,17\}$;因素集 $X=\{x_1,x_2,x_3,x_4\}=\{\text{外观,色泽,气味,口感}\}$;评语集 $Y=\{y_1,y_2,y_3,y_4\}=\{\text{非常满意,满意,一般,不满意}\}=\{100,80,60,40\}$;权重系数集 $W=\{w_1,w_2,w_3,w_4\}=\{0.3,0.1,0.2,0.4\}$ 。

建立因素模糊综合评价矩阵^[26]:评价小组对每个样品的每一因素进行逐个评判,对每个样品4个因素下的每个评语的人次进行归一化处理,即 $A=[a_1^*,\cdots,a_i^*,\cdots,a_5^*]$,

$$a_i^*=a_i/\sum_{i=1}^5 a_i$$

分别统计每个因素 x_i 所对应的模糊评价矩阵 $R_i=(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{in})\in f(Y)$,可以得到每个样品的因素模糊综合评价矩阵。

建立模糊数学评价模型^[27]:评价集 $B_i=W\times R_i(i=1,2,3,\cdots,17)$,其中 B 为评价集, W 为权重系数, R 为模糊评价矩阵。

计算模糊数学感官评分 T : $T_i=B_i\times Y(i=1,2,3,\cdots,17)$ 。

1.3.6 理化指标的测定

总酸含量:参考GB/T 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》^[28]方法测定;pH:采用pH计测定;总糖含量:参考GB 5009.8—2023《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》^[29]测定;总黄酮含量:参考王丽雨等^[30]的方法测定;总酚含量:采用宁二娟等^[31]的方法测定;固形物含量及微生物指标:参考T/CASME 435—2023《益生菌发酵植物饮料》^[32]测定。

1.3.7 抗氧化能力的测定

2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid),ABTS)自由基清除能力的测定:采用T-AOC试剂盒;1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl,DPPH)自由基清除能力的测定:

参考李安平等^[33]的方法;羟自由基($\cdot\text{OH}$)清除能力的测定:参考徐瑶等^[34]的方法。

1.3.8 数据处理

采用SPSS 17.0软件进行统计学分析,以 $P<0.05$ 为显著性水平。采用GraphPad-Prism 7、Origin 2019绘制图形,采用Design Expert 8.0.6软件进行响应面分析。

2 结果与分析

2.1 竹笋汁饮品发酵工艺优化单因素试验

2.1.1 红茶菌添加量对竹笋汁饮品感官评分的影响

红茶菌添加量对竹笋汁饮品感官评分的影响见图1。由图1可知,随着红茶菌添加量的增加,感官评分呈现先升高后下降的趋势,当红茶菌添加量为6%时,感官评分最高,为81分。分析原因可能是红茶菌添加量过高,细菌会大量增殖,产生大量的代谢产物,导致细胞早衰、自溶等现象^[35],同时,菌膜中的微生物会消耗发酵液中的大量营养物质用于自身繁殖,导致产生较多酸味,同时伴随大量代谢废物的产生,从而影响发酵液的质量^[36]。因此,确定红茶菌的最佳添加量为6%。

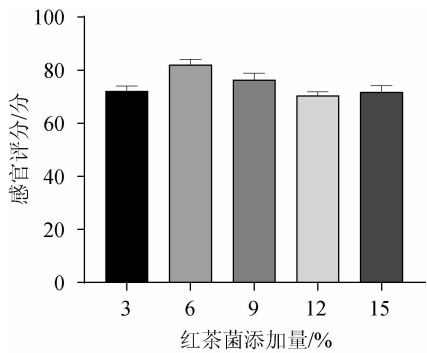


图1 红茶菌添加量对竹笋汁饮品感官评分的影响

Fig. 1 Effect of kombucha addition on sensory score of bamboo shoot juice beverage

2.1.2 复合发酵温度对竹笋汁饮品感官评分的影响

复合发酵温度对竹笋汁饮品感官评分的影响见图2。

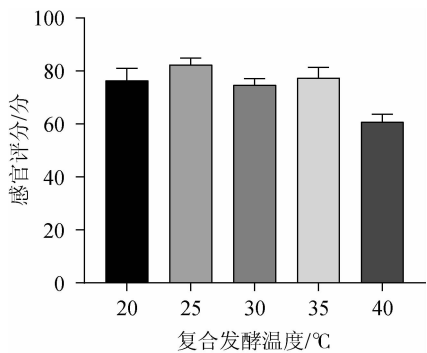


图2 复合发酵温度对竹笋汁饮品感官评分的影响

Fig. 2 Effect of composite fermentation temperature on sensory score of bamboo shoot juice beverage

由图2可知,随着复合发酵温度的升高,竹笋汁饮品的感官评分呈先升高后下降的趋势。当复合发酵温度为25℃时,感官评分最高,为82分,此时竹笋汁饮品的感官酸甜适中,口感细腻润滑,气味协调柔和。分析原因可能是,当发酵温度较低时,菌种代谢较慢,此时酵母菌没有进行很好的生长,饮料风味带有少许酒味,香味比较淡^[37],而发酵温度较高时,发酵菌种体内的酶会失活,同时菌种生长迅速,会产生大量发酵沉淀物,造成饮料的颜色呈暗黄色,竹笋汁饮品出现浑浊,使得产品品质下降^[38]。同时在培养温度为28℃时,红茶菌活菌数最多,pH值也相对较低,菌膜较薄^[39],因此,确定最佳复合发酵温度为25℃。

2.1.3 复合发酵时间对竹笋汁饮品感官评分的影响

复合发酵时间对竹笋汁饮品感官评分的影响见图3。由图3可知,随着发酵时间的延长,竹笋汁饮品的感官评分呈先升高后下降的趋势。当发酵时间为3 d时,竹笋汁饮品的感官评分最高,为82分。分析原因可能是,在发酵过程中醋酸菌与酵母菌大量发酵产生独特的红茶菌感官风味,而当发酵时间过长,会导致酵母细胞自身发酵能力降低,自溶率增加^[40],竹笋汁饮品色泽及口感变差,感官评分下降。因此,确定最佳复合发酵时间为3 d。

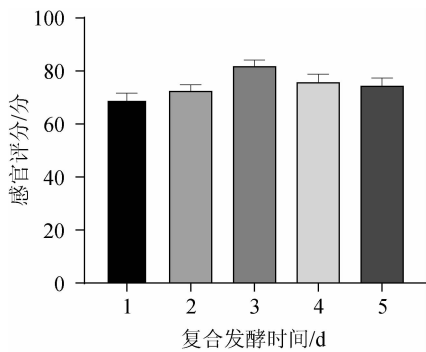


图3 复合发酵时间对竹笋汁饮品感官评分的影响

Fig. 3 Effect of composite fermentation time on sensory score of bamboo shoot juice beverage

2.2 竹笋汁饮品发酵工艺优化响应面试验

在单因素试验的基础上,选取红茶菌添加量(A)、复合发酵时间(B)和复合发酵温度(C)为考察因素,以模糊数学感官评分(Y)为响应值,采用Design Expert 8.0.6软件设计3因子3水平的Box-Behnken响应面试验,试验设计及结果见表3,方差分析结果见表4。

采用Design Expert 8.0.6软件对表3试验结果进行多元回归拟合分析,得到各因素与竹笋汁饮品感官评分的二次多项回归方程: $Y=85.4-1.37A-4.37B-C-1.5AB-2.75AC-1.75BC-3.2A^2-4.2B^2-9.45C^2$ 。

由表4可知,模型的F值为81.29, $P<0.001$,表示模型极显著;失拟项 $P>0.05$,不显著,表明模型可靠。决定系数 $R^2=0.991$,表明竹笋汁饮品感官综合评分的变化有98.2%来

自于红茶菌添加量、复合发酵温度、复合发酵时间,说明这3个因素对竹笋汁饮品感官综合评分有影响。调整决定系数 $R^2_{Adj}=0.979$,表明拟合度较好,能够较好地反映出试验数据与感官评分之间的良好关系。由P值可知,一次项C和交互项AB对结果影响显著($P<0.05$),一次项A、B,交互项AC、BC及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对结果影响极显著($P<0.01$)。由F值可知,各因素对竹笋汁饮品影响的主次顺序为 $B>A>C$,即复合发酵温度>红茶菌添加量>复合发酵时间。

表3 竹笋汁饮品发酵工艺优化Box-Behnken试验设计及结果

Table 3 Design and results of Box-Behnken tests for bamboo shoot juice drink fermentation process optimization

试验号	A 红茶菌添加量/%	B 复合发酵时间/d	C 复合发酵温度/℃	模糊数学感官评分/分
1	4	2	25	82
2	8	2	25	83
3	4	4	25	76
4	8	4	25	71
5	4	3	23	73
6	8	3	23	75
7	4	3	27	76
8	8	3	27	67
9	6	2	23	75
10	6	4	23	70
11	6	2	27	77
12	6	4	27	65
13	6	3	25	85
14	6	3	25	87
15	6	3	25	86
16	6	3	25	85
17	6	3	25	84

表4 回归模型方差分析结果

Table 4 Variance analysis of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	763.29	9	84.81	85.42	<0.000 1	**
A	15.12	1	15.12	15.23	0.005 9	**
B	153.12	1	153.12	154.23	<0.000 1	**
C	8.00	1	8.00	8.06	0.025 1	*
AB	9.00	1	9.00	9.06	0.019 6	*
AC	30.25	1	30.25	30.47	0.000 9	**
BC	12.25	1	12.25	12.34	0.009 8	**
A ²	43.12	1	43.12	43.43	0.000 3	**
B ²	74.27	1	74.27	74.81	<0.000 1	**
C ²	376.01	1	376.01	378.72	<0.000 1	**
残差	6.95	7	0.99			
失拟项	1.75	3	0.58	0.45	0.731 8	不显著
纯误差	5.20	4	1.30			
总和	770.24	16				

注:“*”表示对结果影响显著($P<0.05$),“**”表示对结果影响极显著($P<0.01$)。

绘制各因素间交互作用对感官评分影响的响应面图，结果见图4。由图4可知，各因素间交互作用对感官评分影响的响应面曲面较为陡峭，等高线近似椭圆形，说明各因素间的交互作用对感官评分影响明显^[4]，这与方差分析结果一致。

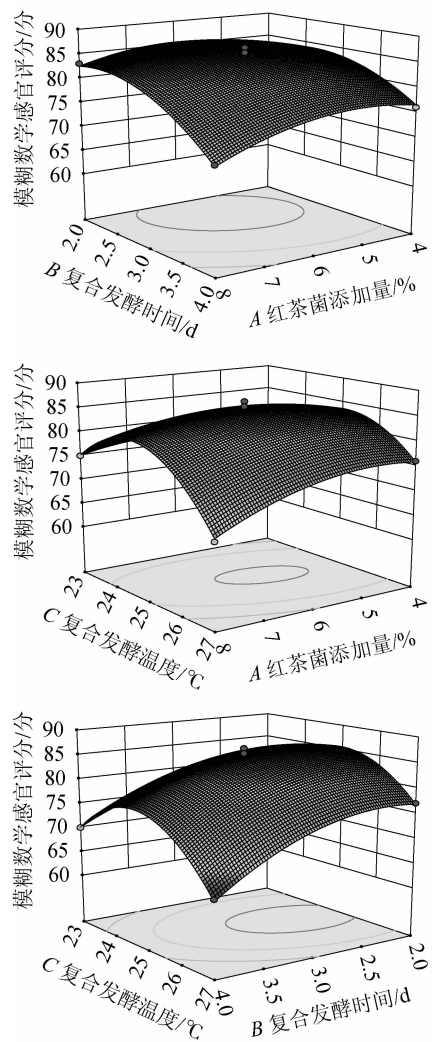


图4 各因素间交互作用对竹笋汁饮品感官评分影响的响应面及等高线图
Fig. 4 Response surface plots and contour lines of effects of interaction between each factors on sensory score of bamboo shoot juice beverage

通过Design-Expert 8.0.6软件对回归方程进行求解，得到竹笋汁饮品的最优发酵工艺条件为红茶菌添加量5.80%、复合发酵温度25.01℃、复合发酵时间2.50 d。在此优化条件下，竹笋汁饮品的感官评分预测值为86.57分，为便于实际操作，将最优发酵工艺条件修订为红茶菌添加量5.8%、复合发酵温度25℃、复合发酵时间2.5 d，在此条件下进行3次验证试验，结果感官评分为85.24分，与预测值接近，说明模型可靠、合理，此时竹笋汁饮品色泽均匀，呈浅黄色的产品，具有竹笋汁特有的清香味，酸味较明显，口感醇厚，质地细腻。

2.3 竹笋汁饮品的品质分析

竹笋汁饮品的基本理化指标、微生物指标及抗氧化能力见表5。由表5可知，竹笋汁饮品的固形物含量为6.13 g/L，pH为3.38，总糖含量为0.16 g/L，总酸含量为41.33 g/L，总酚含量为7.74 mg/L，总黄酮含量为0.066 mg/mL；益生菌活菌数为3.5×10⁷ CFU/g，酵母菌含量为5.07 CFU/mL，大肠菌群、沙门氏菌及霉菌未检出，说明其理化指标及微生物指标均符合标准T/CASME 435—2023《益生菌发酵植物饮料》。由表5亦可知，竹笋汁饮品的ABTS自由基清除率为18.57%，DPPH·清除率为64.03%，·OH清除率为46.62%，说明竹笋汁饮品具有一定的抗氧化能力。

表5 竹笋汁饮品的理化指标及抗氧化能力测定结果
Table 5 Determination results of physicochemical indexes and antioxidant ability of bamboo shoot juice beverage

	指标	结果
理化	固形物含量/(g·L ⁻¹)	6.13
	pH值	3.38±0.12
	总糖含量/(g·L ⁻¹)	0.16±0.11
	总酚/(mg·L ⁻¹)	7.74±0.25
	总黄酮/(mg·mL ⁻¹)	0.066±0.18
	总酸/(g·L ⁻¹)	41.33±0.21
微生物	益生菌活菌数/(CFU·g ⁻¹)	3.5×10 ⁷
	大肠菌群/(CFU·mL ⁻¹)	-
	沙门氏菌/25 mL	-
	酵母菌/(CFU·mL ⁻¹)	5.07
抗氧化	霉菌/(CFU·mL ⁻¹)	-
	ABTS清除率/%	18.57±0.13
	·OH清除率/%	46.62±0.22
	DPPH·清除率/%	64.03±0.12

注：“-”表示未检出。

3 结论

本研究以清水竹笋罐头生产过程中产生的清水为原料，以发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*)与红茶菌为菌种进行复合发酵制备竹笋汁饮品。通过单因素试验、模糊数学综合评价结合响应面法优化得到竹笋汁饮品的最优发酵工艺为发酵乳杆菌前发酵12 h，红茶菌添加量5.8%、复合发酵温度25℃、复合发酵时间2.5 d。在此优化条件下，竹笋汁饮品色泽均匀，呈浅黄色的产品，具有竹笋汁特有的清香味，酸味较明显，口感醇厚，质地细腻，感官评分为85.24分，其pH为3.38，总糖含量为0.16 g/L，总酸含量为41.33 g/L，总酚含量为7.74 mg/L，总黄酮含量为0.066 mg/mL，ABTS自由基清除率为18.57%，DPPH·清除率为64.03%，·OH清除率为46.62%，固形物含量为6.13 g/L，微生物指标均符合T/CASME 435—2023《益生菌发酵植物饮料》的要求。本研究为竹笋汁饮品的制作提供了更加广泛的思路，对调配成发酵饮料具有指导意义。

参考文献:

- [1] 申景昕, 范少辉, 徐晴, 等. 竹类植物生长影响因素研究进展[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(1): 96-102.
- [2] 李琴, 汪奎宏, 张都海. 中国竹笋加工与贸易现状[J]. 浙江林业技, 2011, 21(2): 10-22.
- [3] 冯爱博, 杨光, 贺亮, 等. 竹笋有效成分提取纯化技术及其生物活性的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(3): 46-50.
- [4] 孙赧, 高全. 竹笋主要化学成分及其口味评价研究[J]. 世界竹藤通讯, 2019, 17(2): 64-66.
- [5] 汤娇娇, 李珂, 张智鑫, 等. 竹笋加工副产物功能成分研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 233-240.
- [6] 姚荷, 谭兴和. 竹笋加工方法研究进展[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 24-27.
- [7] 李慧勤, 彭见林, 赵国华. 竹笋加工中的营养成分变化及安全性研究进展[J]. 食品工业, 2012, 33(1): 130-134.
- [8] LIK, GAON, TANG J, et al. A study on the formation of flavor substances by bacterial diversity in the fermentation process of canned bamboo shoots in clear water[J]. *Foods*, 2023, 12(18): 3478.
- [9] ZUBAIDAH E, IFADAHR A, KALSUM U, et al. Anti-diabetes activity of Kombucha prepared from different snake fruit cultivars[J]. *Nutr Food Sci*, 2019, 49(2): 333-343.
- [10] ELKH TABE, EL-ALFY M, SHENANA M, et al. New potentially antihypertensive peptides liberated in milk during fermentation with selected lactic acid bacteria and Kombucha cultures[J]. *J Dairy Sci*, 2017, 100(12): 9508-9520.
- [11] LIANG Z, MENG J M, LI Y L, et al. Stability of tea polyphenols solution with different pH at different temperatures[J]. *Int J Food Prop*, 2017, 20(1): 1-18.
- [12] JONAS D R, LUC D V. Acetic acid bacteria in fermented foods and beverages[J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2018, 49: 115-119.
- [13] 檀馨悦, 黎琪, 王晴, 等. 红茶菌中风味物质相关功能微生物的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 327-335.
- [14] 姜薇, 杨皖松, 李梦蝶, 等. 枇杷红茶菌饮料发酵工艺研究[J]. 绍兴文理学院学报, 2023, 43(8): 78-84.
- [15] VILLARREAL-SOTO S A, BEAUFORT S, BOUJILA J, et al. Understanding Kombucha tea fermentation: A review[J]. *Food Sci*, 2018, 83(3): 580-588.
- [16] 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.
- [17] 代牡丹, 锡林高娃, 吴金花, 等. 内蒙古地区传统发酵乳中乳酸菌的分离与鉴定[J]. 中国乳品工业, 2023, 51(5): 31-35.
- [18] 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.
- [19] 冯涛, 马博文, 庄海宁, 等. 模糊综合评判结合响应面法优化苹果酒发酵工艺[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 93-98.
- [20] 陈秋慧, 魏建敏, 穆先, 等. 刺梨果渣酵素复合发酵工艺优化[J]. 中国调味品, 2023, 48(9): 122-130.
- [21] 柴丽娜, 徐伟, 吕欢, 等. 老山芹红茶菌发酵饮料的工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 69-73.
- [22] LEE S J, KWON Y A. Study on fuzzy reasoning application for sensory evaluation of sausages[J]. *Food Control*, 2007, 18(7): 811-816.
- [23] 刘加友, 陈兵兵, 王振斌, 等. 模糊数学和响应面在葛根乳酸菌饮料感官评定中的应用[J]. 中国食品学报, 2017, 17(1): 224-229.
- [24] 高妍妍. 红茶菌优势菌株分离鉴定及水果红茶菌饮料活性成分分析[D]. 开封: 河南大学, 2019.
- [25] 王晓婧, 王萌. 模糊数学评价结合响应面法优化红枣核桃发酵乳饮料工艺[J]. 粮食科技与经济, 2023, 48(2): 97-101, 108.
- [26] 马宁原, 马博文, 姚凌云, 等. 模糊综合评判结合响应面优化黄桃酒发酵工艺[J]. 中国酿造, 2021, 40(10): 225-230.
- [27] 宋于洋, 塔依尔, 冯建荣. 模糊综合评判在葡萄酒品尝中的应用[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2002(2): 35-36.
- [28] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 12456—2021 食品中总酸的测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [29] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.8—2023 食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [30] 王丽丽, 林清霞, 宋振硕, 等. 分光光度法测定茶叶中总黄酮含量[J]. 茶叶学报, 2021, 62(1): 1-6.
- [31] 宁二娟, 陈玲, 王学方, 等. 20种牡丹叶中总黄酮、总酚和芍药苷的含量测定及抗氧化活性研究[J]. 饲料研究, 2023, 46(4): 75-80.
- [32] 中国中小商业企业协会. T/CASME 435—2023 益生菌发酵植物饮料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [33] 李安平, 谢碧霞, 陶俊奎, 等. 竹笋抗氧化活性比较研究[J]. 营养学报, 2008(3): 321-32.
- [34] 徐瑶, 陈雪峰, 刘宁. 硫酸酯化苹果水溶性膳食纤维的抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(12): 116-119.
- [35] 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.
- [36] 张文莉, 姚稳, 巫永华, 等. 红茶菌发酵山药枸杞果醋的工艺研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 119-123.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 马燕, 黄海珠, 金桩, 等. 红茶菌在绿茶液中培养条件优化[J]. 畜牧兽医科学(电子版), 2019(22): 1-3.
- [40] 孙鹤, 刘晓媛, 汪雅馨, 等. 红茶菌水蜜桃酒的发酵工艺优化[J]. 粮食加工, 2023, 48(4): 56-63.
- [41] 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.