

响应面法优化红茶菌细菌纤维素生产条件

吴家奇, 李力*, 白金, 马森*

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450052)

摘要: 为提高红茶菌发酵细菌纤维素的产量, 以红茶菌细菌纤维素干重为指标, 采用响应面法对发酵条件进行优化, 同时测定了细菌纤维素的基本理化性质。通过单因素试验及响应面法对确定红茶菌发酵生产 BC 的最佳培养条件为: 茶汤体积分数 0.83%、蔗糖质量分数 10.42%、装液量 70.22%、培养温度 29.33 °C。经验证试验, 在此条件下实际得到细菌纤维素产量达 4.21 g/L, 较优化前(茶汤体积分数 0.8%, 蔗糖质量分数 6%, 装液量 60%, 培养温度 30 °C, 产量 2.63 g/L) 提高了 60.08%。对培养所得红茶菌纤维素干燥后进行理化性质测定, 表明粗蛋白、粗淀粉、膳食纤维与灰分的质量分数分别为 3.01%、1.01%、85.67%、6.1%; 扫描电镜表明细菌纤维素具有超微网状结构, 其纤维直径属于纳米级别; 拉伸试验表明红茶菌纤维素强度约达 2.28 MPa; X 射线衍射分析细菌纤维素的结晶度为 81.30%。利用响应面优化法有效提高了红茶菌细菌纤维素的产量。

关键词: 红茶菌; 细菌纤维素; 响应面优化试验

文章编号: 1673-9078(2024)06-133-140

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0676

Optimization of Production Conditions for Kombucha Bacterial Cellulose by the Response Surface Method

WU Jiaqi, LI Li*, BAI Jin, MA Sen*

(School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To improve the yield of bacterial cellulose (BC) during kombucha fermentation, the response surface method was employed to optimize the fermentation conditions using the dry weight of kombucha BC as an indicator, and the basic physicochemical properties of BC were measured. Using single-factor experiments and the response surface method, the optimal culture conditions for BC production by kombucha fermentation are as follows: tea volume fraction 0.83%, sucrose mass fraction 10.42%, liquid loading 70.22%, and culture temperature 29.33 °C. The experimental results showed an actual yield of 4.21 g/L BC under these conditions, which is 60.08% higher than that obtained without optimization (tea volume fraction of 0.8%, sucrose mass fraction 6%, liquid loading of 60%, culture temperature of 30 °C, yield of 2.63 g/L). Measurement of the physicochemical properties of kombucha BC showed mass fractions of 3.01, 1.01, 85.67, and 6.1% for crude protein, crude starch, dietary fiber, and gray score, respectively. Scanning electron microscopy (SEM) indicated an ultra-network structure and a fiber diameter at the nanometer scale for kombucha BC, while tensile testing indicated a cellulose strength of

引文格式:

吴家奇,李力,白金,等.响应面法优化红茶菌细菌纤维素生产条件[J].现代食品科技,2024,40(6):133-140.

WU Jiaqi, LI Li, BAI Jin, et al. Optimization of production conditions for kombucha bacterial cellulose by the response surface method [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 133-140.

收稿日期: 2023-06-06

基金项目: 河南省高校科技创新人才支持计划 (23HASTIT033); 河南省科技研发计划联合基金项目 (232103810060; 232103810066)

作者简介: 吴家奇 (1996-), 女, 在读研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: wujiaqi6285@163.com

通讯作者: 李力 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食微生物应用与安全控制理论, E-mail: lili@haut.edu.cn; 共同通讯作者: 马森

(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物资源利用与开发, E-mail: masen@haut.edu.cn

approximately 2.28 MPa. X-ray diffraction analysis showed that the crystallinity of BC is 81.30%. Optimization based on the response surface method can thus effectively improve the yield of kombucha BC.

Key words: kombucha; bacterial cellulose; response surface method-based optimization

红茶菌是一种起源于中国东北地区的传统酸性益生饮料,因其清香可口,工艺简单,并且具有多种营养保健功能,现在世界各国广泛流行,深受人们的喜爱^[1]。红茶菌细菌纤维素是发酵红茶菌饮料的产物之一,在含有茶提取物和碳源的培养基中,在酵母菌的促进下,由红茶菌中的葡糖酸醋杆菌合成的,其本质上是一种高结晶度的纤维素^[2]。在发酵过程中,酵母菌、醋酸菌、乳酸菌等微生物组成共生体,酵母菌将蔗糖分解为果糖和葡萄糖,之后被醋酸菌利用,合成表面膜以免受外部竞争者和污染物的伤害,酵母菌产生的乙醇等产物也能刺激醋酸菌的纤维素合成酶机制产生纤维素膜^[3]。细菌纤维素(Bacteria Cellulose, BC)是由 β -1,4糖苷键相互连接而形成的胞外不可溶性多糖,与植物纤维素具有相同的分子结构,但细菌纤维素不含有半纤维素、木质素等物质,因此其纯度远高于植物纤维素^[4,5]。同时,细菌纤维素还具有极强的亲水力、较好的生物可降解性、环境友好性和生物相容性等许多优良特性,从而在许多领域中都有着广泛的应用和许多潜在的高附加值利用价值,如生物医药、化妆品、纺织造纸和食品工业等^[6,7]。但其低产量和高生产成本仍是严重的缺点,在很大程度上限制了其在工业、食品、复合材料等行业中的广泛应用。因此开展发酵条件优化、改进发酵方式等都是非常活跃的研究方向。

本试验采用响应面法,以红茶菌细菌纤维素干重为指标,对红茶菌发酵条件进行优化,同时测定了红茶菌细菌纤维素的基本理化性质。

1 材料与方法

1.1 试验材料

红茶菌发酵母液,河南工业大学保藏菌种;NaOH(分析纯),天津市天力化学实际有限公司;蔗糖(分析纯AR),天津市科密欧化学试剂有限公司;红茶茶叶,福建省安溪闽绿茶叶有限公司。

1.2 仪器与设备

SPX型生化培养箱,北京市永光明医疗仪器有

限公司;LS-75LJ型立式压力蒸汽灭菌器,江阴滨江医疗设备有限公司;SW-CJ-2D型双人超净工作台,上海树立仪器仪表有限公司。

1.3 方法

1.3.1 红茶菌发酵基液制备

茶叶浸提→过滤→加糖→灭菌→冷却→接种→发酵

将茶叶按0.8%(*m/V*)比例加入沸水中制作茶汤,浸提20 min,滤去茶渣,加入8%(*m/V*)蔗糖混匀,每500 mL三角瓶中装200 mL茶汤并用6层纱布封口,121℃灭菌20 min,冷却至室温后,接入2%(*m/V*)红茶菌纤维素,10%(*V/V*)发酵母液,30℃恒温静置培养10 d^[8]。

1.3.2 红茶菌纤维素的处理

培养结束后,将培养基中的红茶菌纤维素膜取出,用蒸馏水多次冲洗,除去残留在膜上的培养液和其他杂质。用0.1 mol/L NaOH溶液煮沸1.5 h,当红茶菌纤维素呈乳白色半透明状后,再用蒸馏水反复洗涤直至其为中性,85℃烘干至恒重,得到的红茶菌纤维素干重即为其产量^[9]。

1.3.3 单因素实验

1.3.3.1 茶汤体积分数

在蔗糖质量分数6%、装液量60%、30℃下静置培养10 d的条件下,分别采用0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%的茶汤体积分数,考察不同茶汤体积分数对红茶菌纤维素产量的影响。

1.3.3.2 蔗糖质量分数

在茶汤体积分数0.8%、装液量60%、30℃下静置培养10 d的条件下,分别采用6%、8%、10%、12%、14%的蔗糖质量分数,考察不同蔗糖质量分数对红茶菌纤维素产量的影响。

1.3.3.3 装液量

在茶汤体积分数0.8%、蔗糖质量分数6%、30℃下静置培养10 d的条件下,分别采用40%、50%、60%、70%、80%的装液量,考察不同装液量对红茶菌纤维素产量的影响。

1.3.3.4 培养温度

在茶汤体积分数0.8%、蔗糖质量分数6%、装液

量 60% 的条件下, 分别在 20、25、30、35、40 °C 下静置培养 10 d, 考察不同培养温度对红茶菌纤维素产量的影响。

1.3.4 响应面优化设计

根据单因素实验结果, 以茶汤体积分数、蔗糖质量分数、培养温度和装液量为自变量, 红茶菌纤维素干重为响应值。根据 Box-Behnken 的设计原理进行四因素三水平的响应面优化试验, 其设计如表 1 所示。

表 1 响应面因素与水平设计

水平	因素			
	A 茶汤体积分数/%	B 蔗糖质量分数/%	C 装液量 /%	D 培养温度/°C
-1	0.6	8	60	25
0	0.8	10	70	30
1	1.0	12	80	35

1.3.5 红茶菌纤维素基本理化性质测定

灰分含量测定: 按照 GB 5009.4-2016 方法测定;

粗蛋白含量测定: 按照 GB 5009.5-2016 方法测定;

粗淀粉含量测定: 按照 GB 5009.6-2016 方法测定;

膳食纤维含量测定: 按照 GB 5009.88-2014 方法测定。

1.3.6 结晶度测试

采用 X 射线衍射分析法进行结晶度测试^[10]。取干燥后并粉碎的红茶菌纤维素粉末, 铜靶, 测试电压 40 kV, 测试电流 100 mA, 速率 (5°)/min, 步宽 0.02°, 2θ 为 0~80° 范围扫描。根据 X 衍射参数, 由下面计算公式计算红茶菌纤维素的结晶度 (X_c)。

$$X_c = \frac{I - I_{am}}{I} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X_c —结晶度;

I —衍射峰的衍射强度;

I_{am} —无定形区衍射强度。

1.3.7 红茶菌纤维素结构检测

采用扫描电子显微镜对红茶菌纤维素膜进行结构检测^[11]。剪取 1 cm³ 左右的烘干的红茶菌纤维素小片粘贴于导电胶上, 并置于真空镀膜机中进行表面喷金 1 min, 喷金后的样品放入扫描电镜中观察并拍照, 观察电压为 5 kV。

1.3.8 断裂强度测定

采用拉伸仪测定红茶菌纤维素干膜拉伸强度。

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{d \times T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

σ —断裂强度;

σ_t —断裂时的拉伸力;

d —试样断裂截面的宽度;

T —试样断裂截面厚度。

1.3.9 数据处理

使用 SPSS 软件对实验数据统计分析, Origin 2021 软件对单因素实验结果进行作图。采用 Design expert 12 响应面试验设计及分析。利用 MDI Jade 6 对 X 射线衍射分析结果进行绘图并计算。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 茶汤体积分数对红茶菌纤维素产量的影响

茶汤中的茶叶浸出物如咖啡因、儿茶素、生物碱的等物质可以促进环二鸟苷酸 (c-di-GMP) 作用于红茶菌, 调控细菌胞外多糖的形成, 从而提高红茶菌纤维素的产量^[12,13]。同时, 茶叶中的酚类物质也会抑制红茶菌的生长^[14]。如图 1 所示, 当茶汤体积分数由 0.2% 升高至 0.8% 时, 红茶菌纤维素产量逐渐升高, 这表明茶汤体积分数在一定程度上可以促进红茶菌纤维素的生成。随着茶汤体积分数的持续升高, 茶多酚对细菌的抑制作用更加明显, 红茶菌纤维素产量有所下降, 但差异性不显著。

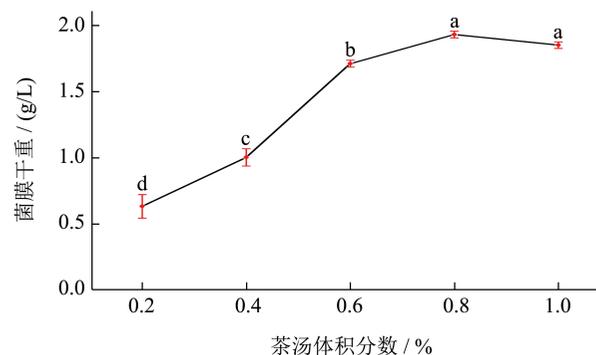


图 1 茶汤体积分数对红茶菌纤维素产量的影响

Fig.1 Effect of tea concentration on the yield of Kombucha bacteria cellulose

2.1.2 蔗糖质量分数对红茶菌纤维素产量的影响

在发酵过程中, 蔗糖作为碳源被微生物利用, 被水解成葡萄糖和果糖, 通过糖酵解途径产生乙醇,

醋酸杆菌等微生物利用葡萄糖产生葡萄糖酸，将乙醇转换成乙酸，而乙醇等产物也能刺激醋酸菌的纤维素合成酶机制产生纤维素膜^[15,16]。如图2所示，当蔗糖质量分数从6%升高至10%时，红茶菌纤维素产量逐渐升高，并在蔗糖质量分数为10%时达到最大，继续升高蔗糖质量分数，红茶菌纤维素产量开始呈现下降趋势。由于蔗糖质量分数持续增大，培养基中的渗透压随之增大，红茶菌的生物活性受到抑制，菌膜产量降低。

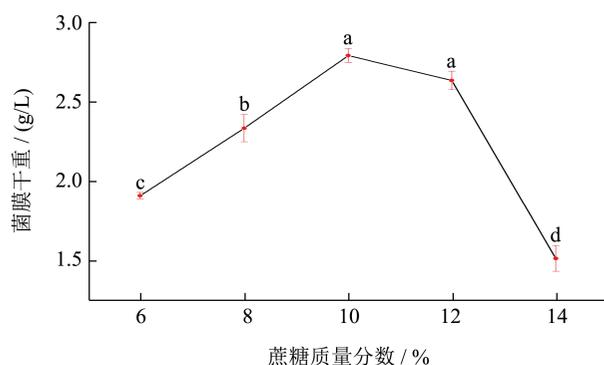


图2 蔗糖质量分数对红茶菌纤维素产量的影响

Fig.2 Effect of sucrose concentration on the yield of Kombucha bacteria cellulose

2.1.3 装液量对红茶菌纤维素产量的影响

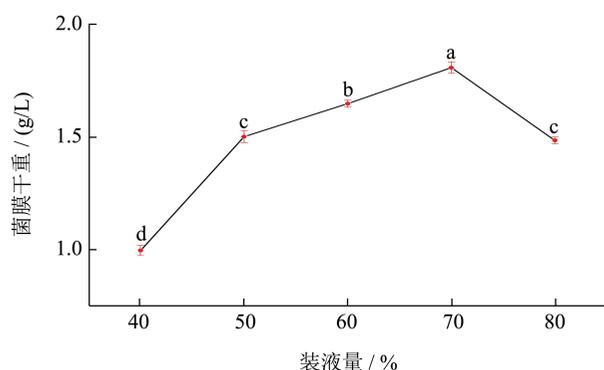


图3 装液量对红茶菌纤维素产量的影响

Fig.3 Effect of medium content on the yield of Kombucha bacteria cellulose

一方面，由于装液量的增加，培养液中的茶提取物及碳源含量增加，在一定程度上促进了红茶菌纤维素的生成；另一方面，不同梯度的装液量反映了不同氧气浓度下红茶菌的生长趋势，从而影响红茶菌纤维素的产量。装液量过高不利于培养液溶氧，氧气浓度低，使酵母菌生理活性降低，减少乙醇的生成，影响醋酸杆菌的生长以及红茶菌纤维素的合成^[13,17]。如图3所示，当装液量从40%升至70%时，红茶菌纤维素产量逐渐升高，当装液量为80%时，

红茶菌纤维素产量迅速下降。

2.1.4 培养温度对红茶菌纤维素产量的影响

酵母菌生长的最适温度为30℃，醋酸杆菌的最适生长温度为28~30℃，这与温度对红茶菌纤维素产量的影响趋势相同^[18,19]。如图4所示，20℃时红茶菌纤维素产量较低，随着温度的升高其产量不断增加，并在30℃时出现最高产量。高温会对细胞内的代谢反应产生负面影响，继续升高培养温度，红茶菌纤维素产量呈下降趋势，当温度达到40℃时，红茶菌的生长受到严重抑制，红茶菌纤维素产量趋近于0。

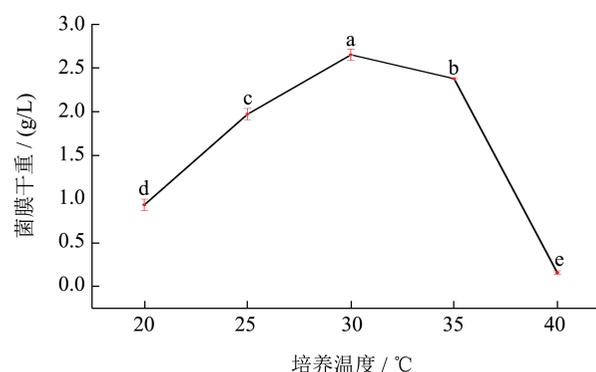


图4 培养温度对红茶菌纤维素产量的影响

Fig.4 Effect of culture temperature on the yield of Kombucha bacteria cellulose

2.2 响应面优化试验结果与分析

在单因素实验的基础上，根据Box-Behnken的实验设计原理，以茶汤体积分数、蔗糖质量分数、装液量和培养温度为自变量，以红茶菌纤维素干重产量为响应值，设计了优化发酵条件的四因素三水平实验，实验设计与结果见表2。

对响应面优化试验结果进行显著性检查、方差分析，结果如表3所示。

表3显示以菌膜产量为响应值的模型方差分析结果，试验所建立的模型拟合性显著($P < 0.01$)，失拟项不显著，表示该模型具有显著性。该模型的二次拟合回归方程为： $Y = 4.01 + 0.1131A + 0.1218B + 0.0029C - 0.6583D + 0.1250AB + 0.220AC + 0.0098AD + 0.0127BC - 0.0423BD - 0.0475CD - 0.4512A^2 - 0.3504B^2 - 0.3560C^2 - 2.49D^2$ ，其中A、B、C、D分别代表茶汤体积分数、蔗糖质量分数、装液量和培养温度。回归系数 R^2 为0.9940，修正后为0.9881，说明该模型能准确预测出红茶菌纤维素的产量。从表3可以看出，对红茶菌纤维素产量影响程度为 $D > B > A > C$ ，即影响最大的因素是培养温度，其次是蔗糖质量分数、茶汤体

积分数和装液量。

红茶菌细菌纤维素生产条件各项单因素交互作用对红茶菌纤维素产量的响应面和等高线图如图 5a~f 所示。曲线越陡峭，表明其交互作用越显著。从图 5 中可以看出，茶汤体积分数、蔗糖质量分数以及装液量和培养温度之间的曲线较为陡峭。

表 2 响应面试验设计及结果

试验号	A	B	C	D	Y 菌膜产量/(g/L)
1	0.8	8	70	25	1.64
2	0.8	8	80	30	3.26
3	0.8	10	60	25	1.71
4	0.8	10	80	35	0.45
5	0.6	12	70	30	3.13
6	0.8	10	70	30	3.93
7	0.8	10	70	30	3.96
8	0.8	12	70	35	0.53
9	0.8	10	70	30	3.97
10	0.8	10	70	30	4.08
11	0.8	10	80	25	1.86
12	1	10	80	30	3.41
13	0.8	8	70	35	0.49
14	1	10	70	35	0.44
15	0.8	10	60	35	0.50
16	0.8	12	80	30	3.48
17	1	10	70	25	1.82
18	0.8	10	70	30	4.14
19	1	10	60	30	3.37
20	0.8	12	70	25	1.85
21	0.6	10	70	25	1.87
22	0.6	10	80	30	2.92
23	0.6	10	70	35	0.45
24	0.6	8	70	30	2.96
25	0.8	12	60	30	3.48
26	0.8	8	60	30	3.32
27	1	8	70	30	2.97
28	0.6	10	60	30	2.97
29	1	12	70	30	3.64

表 3 响应面试验方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	46.13	14	3.29	166.94	<0.000 1	**
A	0.153 5	1	0.15	7.77	0.014 5	*
B	0.178 1	1	0.18	9.02	0.009 5	**
C	0.000 1	1	0.000 1	0.005 2	0.943 7	
D	5.20	1	5.20	263.51	<0.000 1	**
AB	0.062 5	1	0.06	3.17	0.096 9	
AC	0.001 9	1	0.001 9	0.098 1	0.758 8	
AD	0.000 4	1	0.000 4	0.019 3	0.891 6	
BC	0.000 7	1	0.000 7	0.032 9	0.858 6	
BD	0.007 1	1	0.007 1	0.361 8	0.557 1	
CD	0.009 0	1	0.009 0	0.457 3	0.509 9	
A ²	1.32	1	1.32	66.92	<0.000 1	**
B ²	0.796 2	1	0.80	40.34	<0.000 1	**
C ²	0.822 0	1	0.82	41.65	<0.000 1	**
D ²	40.35	1	40.35	2 044.38	<0.000 1	**
残差	0.276 3	14	0.019 7			
失拟误差	0.243 8	10	0.024 4	3.00	0.150 3	
纯误差	0.032 5	4	0.008 1			
总和	46.40	28				

注: * 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

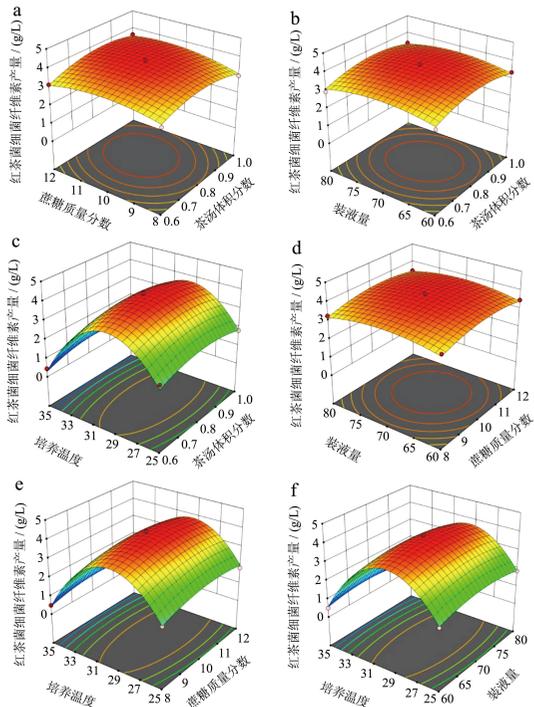


图 5 各因素交互作用对红茶菌细菌纤维素产量的影响

Fig.5 Effects of interaction of various factors on the yield of Kombucha bacterial cellulose

通过响应面试验结果分析得, 红茶菌细菌纤维素的最佳培养条件为茶汤体积分数 0.83%、蔗糖质量分数 10.42%、装液量 70.22%、培养温度 29.33 ℃。经验证试验, 测得在此条件下, 红茶菌纤维素产量为 4.21 g/L, 较优化前(茶汤体积分数 0.8%、蔗糖质量分数 6%、装液量 60%、培养温度 30 ℃、产量 2.63 g/L) 提高了 60.08%。

2.3 红茶菌纤维素基本理化指标测定

红茶菌细菌纤维素的基本理化指标如表 4 所示。由表 4 可知, 新鲜红茶菌细菌纤维素的含水量高达 98.66%, 烘干后的红茶菌纤维素中, 灰分和膳食纤维质量分数分别为 10.70%、85.67%, 并含有少量淀粉和蛋白质。

2.4 结晶度测试

细菌纤维素是由结晶区和无定形区纤维素所组成的, X 射线衍射谱(XRD)中的尖峰为晶区所对应的衍射峰。经烘干后磨碎过筛的红茶菌纤维素的 XRD 分析结果如图 6 所示。

表 4 红茶菌纤维素基本理化指标 (%)

Table 4 Basic physicochemical indexes of Kombucha bacterial cellulose				
样品	粗蛋白	粗淀粉	灰分	膳食纤维
红茶菌纤维素	3.01 ± 0.02	1.01 ± 0.18	10.70 ± 0.15	85.67 ± 1.58

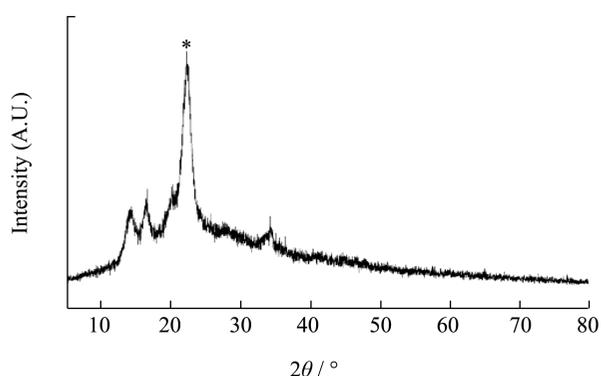


图 6 红茶菌细菌纤维素的 XRD 图谱分析

Fig.6 XRD analysis of Kombucha bacteria cellulose

根据 X 衍射参数, $I = 1\ 292.16$, $I_{am} = 241.64$ 。根据公式 (1) 计算得: $X_c / \% = 81.30\%$

与红茶菌细菌纤维素结晶度相较, 植物纤维与合成纤维结晶度较低。方忠艳等^[20]对 14 个种源的山棕纤维进行结晶度测试, 发现其值在 36.43%~38.21% 之间。

2.5 红茶菌纤维素纤维素结构检测

利用扫描电镜对红茶菌细菌纤维素进行观察, 如图 7 所示。红茶菌细菌纤维素是由微纤维高密度缠绕在一起的, 具有超微细网状结构。其直径一般在 10~100 nm 之间, 与植物纤维、合成纤维相比有明显差异。植物纤维和合成纤维的直径通常在 1 厘米以上, 而且呈现出个体分布均匀的特点^[5,21-23]。

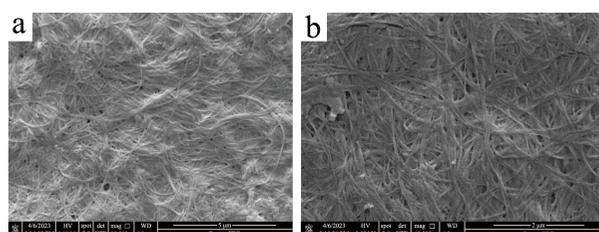


图 7 红茶菌细菌纤维素微观结构

Fig.7 Microstructure of Kombucha bacterial cellulose

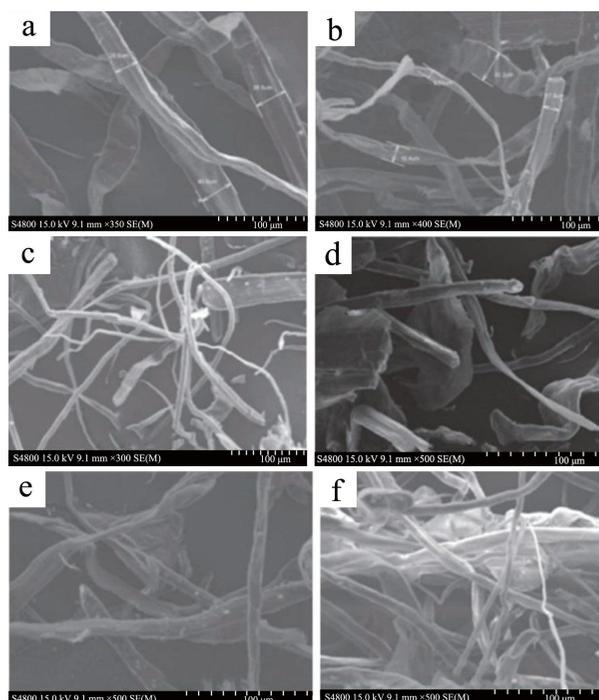


图 8 几种植物纤维微观结构

Fig.8 Microstructure of several plant fibers

注: (a) 木纤维; (b) 稻草纤维; (c) 草纤维; (d) 广西甘蔗渣; (e) 泰国甘蔗渣纤维; (f) 竹纤维。

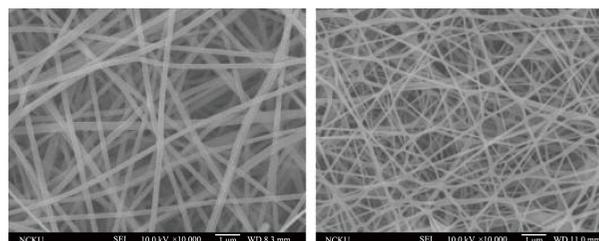


图 9 碳纳米纤维微观结构

Fig.9 Microstructure of carbon nanofibers

红茶菌细菌纤维素微纤维直径较小, 主要原因是其生物合成机制的差异。植物纤维和合成纤维通常是通过线性生长的方式形成, 纤维直径受到生长方式和外部因素(如化学处理、热处理等)影响, 而细菌纤维素则是一种自组装的天然生物高分子, 是由一些细菌根据一定的合成机制在胞外自行组装形成的, 其直径的大小主要受到细胞合成能力和细胞环境的影响^[24-26]。

2.6 断裂强度测定

采用拉伸强度测定仪测定红茶菌细菌纤维素干膜断裂强度。断裂强度是材料发生断裂时的拉力与断裂横截面积的比值。经测量, 红茶菌纤维素试样断裂时宽度为 18.00 mm, 平均厚度为 0.08 mm。根据公式(2)计算得: 当以 15 mm/min 的速度拉伸时, 细菌纤维素干膜的拉伸强度约为 2.28 MPa。

3 结论

以蔗糖为碳源培养红茶菌生产红茶菌细菌纤维素, 通过单因素实验及响应面优化试验确定红茶菌发酵生产红茶菌细菌纤维素的最佳培养条件为: 茶汤体积分数 0.83%、蔗糖质量分数 10.42%、装液量 70.22%、培养温度 29.33 °C。经验证试验, 在此条件下实际得到红茶菌细菌纤维素产量达 4.21 g/L, 较优化前(茶汤体积分数 0.8%、蔗糖质量分数 6%、装液量 60%、培养温度 30 °C、产量 2.63 g/L)提高了 60.08%, 利用响应面优化法有效提高了红茶菌细菌纤维素的产量。对培养所得红茶菌细菌纤维素干燥后进行理化性质测定, 结果表明红茶菌细菌纤维素中膳食纤维含量较高, 其结构为纳米网状结构, 具有较高的结晶度和抗拉伸能力。

参考文献

- [1] 余瞻, 赵福权, 徐成龙, 等. 红茶菌中细菌纤维素产生菌的筛选、鉴定及其发酵动力学模型构建[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 92-98.
- [2] ZHAI X C, LIN D H, LI W W, et al. Improved characterization of nanofibers from bacterial cellulose and its potential application in fresh-cut apples [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 178-186.
- [3] JESSICA ML, LUCIA VS, RASU J, et al. A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites [J]. Cyta-Journal of Food, 2018, 16(1): 390-

- 399.
- [4] BARUDHS, SOUZA JL, SANTOS DB, et al. Bacterial cellulose/poly (3-hydroxybutyrate) composite membranes [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(3): 1279-1284.
- [5] JOZALA AF, DELENCASTRE-NOVAES LC, LOPESAM, et al. Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(5): 2063-2072.
- [6] EL-WAKILNA, HASSANEA, HASSANML, et al. Bacterial cellulose/phytochemical's extracts biocomposites for potential active wound dressings [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(26): 26529-26541.
- [7] KAMINSKIK, JAROSZM, GRUDZIENJ, et al. Hydrogel bacterial cellulose: a path to improved materials for new eco-friendly textiles [J]. Cellulose, 2020, 27(9): 5353-5365.
- [8] 涂传海. 红茶菌发酵黄浆水的代谢组与宏基因组分析及一株耐高渗酵母的益生特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [9] 钱子俊, 张一瞳, 刘鹏, 等. 不同添加剂对木醋杆菌发酵细菌纤维素的影响[J]. 林业工程学报, 2018, 3(4): 62-67.
- [10] CHAO Y, ISHIDAT, SUGANOY, et al. Bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* in a 50-L internal-loop airlift reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2000, 68(3): 345-352.
- [11] 陈慧慧, 刘玉, 王慧梅. 利用杨木水解液制备细菌纤维素[J]. 生物技术通报, 2017, 33(3): 144-150.
- [12] 赵腊梅, 孙惠芳, 刘正杰, 等. c-di-GMP对细菌胞外多糖合成与运输的调控[J]. 微生物学通报, 2017, 44(5): 1196-1205.
- [13] 周艳, 谭丽丽, 唐欣昀. 纯菌种培养红茶菌中细菌纤维素的合成[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 255-257, 260.
- [14] 宋军霞, 祁红兵, 彭璐. 三种茶叶的抑菌作用研究[J]. 农产品加工, 2022, 4: 10-14.
- [15] SINGHANIARR, RUIZHA, AWASTHI MK, et al. Challenges in cellulase bioprocess for biofuel applications [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111622.
- [16] PORTELA R, LEAL CR, ALMEIDA PL, et al. Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications [J]. Microbial Biotechnology, 2019, 12(4): 586-610.
- [17] 雒晓芳, 徐开慧, 王迎菲, 等. 两株微生物菌株对阿维菌素降解性能的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(12): 2089-2097.
- [18] DIEZ-OZAETA I, ASTIAZARAN OJ. Recent advances in Kombucha tea: Microbial consortium, chemical parameters, health implications and biocellulose production [J].

- International Journal of Food Microbiology, 2022, 377: 109783.
- [19] VOLOVATG, PRUDNIKOVASV, SUKOVATYI AG, et al. Production and properties of bacterial cellulose by the strain *Komagataeibacter xylinus* B-12068 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(17): 7417-7428.
- [20] 方忠艳,廖薇,余丽萍,等.贵州不同种源山棕纤维结晶度的分析与比较[J].西部林业科学,2018,47(1):92-96,103.
- [21] STUMPF TR,YANGXY, ZHANGJC, et al. In situ and ex situ modifications of bacterial cellulose for applications in tissue engineering [J]. Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications, 2018, 82: 372-383.
- [22] 尹丰伟,孙小龙,张平,等.利用植物纤维制备可生物降解食品包装材料的研究进展[J].生物加工过程,2021,19(4): 358-365.
- [23] HUS YH, LAI CC, Ho CL, et al. Preparation of interconnected carbon nanofibers as electrodes for supercapacitors [J]. Electrochimica Acta, 2014, 127: 369-376.
- [24] TAN LL, REN L, CAO YY, et al. Bacterial cellulose synthesis in Kombucha by *Gluconacetobacter* sp and *Saccharomyces* sp [J]. Advanced Materials Research, 2012, 554-556: 1000-1003.
- [25] BLANCO PFG, SANTOSO SP. CHOU CC et al. Current progress on the production, modification, and applications of bacterial cellulose [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2020, 40(3): 397-414.
- [26] XIANG ZY, LIU QG, CHEN Y, et al. Effects of physical and chemical structures of bacterial cellulose on its enhancement to paper physical properties [J]. Cellulose, 2017, 24(8): 3513-3523.