

红茶菌液水蜜桃果酒发酵动力学模型建立及抗氧化性分析

张阳阳, 孙鹤, 李建芳, 朱静, 王荣荣*, 万明晟

(信阳农林学院食品学院, 河南信阳 464000)

摘要: 该试验以水蜜桃和红茶菌液为原料, 酿制红茶菌液水蜜桃果酒, 探究其发酵过程中菌体生长、基质消耗、产物生成的动力学变化并分析相关性, 并对其两种抗氧化性物质以及三种自由基清除率进行测定并分析其相关性。结果表明: SGompertz 模型可以较好的反映酵母菌生长的变化, Boltzmann 模型对乙醇生成变化的拟合度最佳, DoseResp 模型能够较好的反映还原糖消耗的变化, 三个模型的相关系数 R^2 均 >0.98 , 表明实验值和模型预测值的拟合度很高, 反映果酒在发酵过程中的动力学特征; 抗氧化性测定结果表明: 随发酵时间的变化总体上均呈现先上升再下降的趋势, 在发酵第 192 小时均达到最高值, 此时总酚和黄酮质量浓度分别为 3 802 mg/mL 和 549 mg/mL, DPPH、ABTS⁺ 和羟基自由基清除率分别为 86.73%、81.87% 和 82.45%, 综合考虑发酵 192 h 可以作为主发酵结束的依据。该研究揭示了红茶菌液水蜜桃酒发酵过程中代谢产物及抗氧化活性的变化规律, 初步判定所建立的模型有效, 可为红茶菌液水蜜桃的工业化生产提供理论依据。

关键词: 红茶菌液水蜜桃果酒; 发酵动力学; 曲线回归方程; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2024)09-127-134

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.9.0996

Establishment of Fermentation Kinetic Model of Kombucha Liquid-peach Fruit Wine and Analysis of Antioxidant Activity

ZHANG Yangyang, SUN He, LI Jianfang, ZHU Jing, WANG Rongrong*, WAN Mingsheng

(College of Food Science, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China)

Abstract: In this experiment, peach fruit and kombucha liquid were used as the raw materials for brewing kombucha liquid-peach fruit wine. The kinetic changes of cell growth, substrate consumption and product generation in the fermentation process were investigated and their correlation was analyzed. Two antioxidant substances and three free radical scavenging rates were also measured and their correlation analyzed. The results showed that the SGompertz model could better reflect the change of yeast growth, the Boltzmann model had the best fitting degree for the change of ethanol production, and the DoseResp model could better reflect the change of reducing sugar consumption. The correlation coefficients (R^2) for all the

引文格式:

张阳阳,孙鹤,李建芳,等.红茶菌液水蜜桃果酒发酵动力学模型建立及抗氧化性分析[J].现代食品科技,2024,40(9): 127-134.

ZHANG Yangyang, SUN He, LI Jianfang, et al. Establishment of fermentation kinetic model of kombucha liquid-peach fruit wine and analysis of antioxidant activity [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 127-134.

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 信阳农林学院青年骨干教师培养计划(张阳阳 2023); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2020GGJS262; 2019GGJS264); 河南省科技攻关项目(212102110314); 信阳农林学院青年基金项目(QN2022029)

作者简介: 张阳阳(1988-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品微生物发酵技术, E-mail: xynlzzh@126.com

通讯作者: 王荣荣(1981-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品微生物发酵技术, E-mail: 513669555@qq.com

three models exceeded 0.98, indicating very high fitting degree between the experimental values and the model predicted values, reflecting the kinetic characteristics of the fruit wine during the fermentation process. The results of the antioxidant assay showed that the changes with the fermentation time generally showed a trend of initial increase then decrease, reaching the highest at the 192th h of fermentation where the total phenolic and flavonoid mass concentrations were 3 802 mg/mL and 549 mg/mL, respectively, and the DPPH, ABTS⁺ and hydroxyl radical scavenging rates were 86.73%, 81.87% and 82.45% respectively. Taking comprehensive considerations into account, 192 h of fermentation can be used as the basis for determining the end of the main fermentation. This study revealed the changing patterns of metabolites and antioxidant activity during the fermentation of kombucha liquid-peach fruit wine. It was preliminarily determined that the established models were valid and can provide a theoretical basis for the industrial production of kombucha liquid-peach fruit wine.

Key words: black tea fungus liquid peach fruit wine; fermentation dynamics; curve regression equation; oxidation resistance analysis

水蜜桃含有丰富的微量元素、多种维生素和抗氧化成分,属于落叶小乔木植物,素有“果中皇后”的美誉,是一种食用价值很高的水果。水蜜桃在我国栽培面积较大,种类繁多,分布较广但它确是较难贮运的水果之一。为了解决之一难题,近年来不少学者对其进行生物加工研究,但目前对水蜜桃的加工还处于初步的阶段,产品附加值极低,一般以罐头、果酱果汁和果干儿果脯为多,利用微生物发酵技术对其进行高值化开发研究较少,目前朱菲等^[1]、康孟利等^[2]、王毓宁等^[3]对水蜜桃果酒的发酵工艺做了初步研究,但单一水蜜桃果酒口感较为单一,糖酸比较高。红茶菌酒作为传统功能性饮料,其发酵液中富含多种活性物质和抗氧化性物质,王利平等^[4]、熊亚等^[5]、孙永康等^[6]都对红茶菌酒的保健性和抗氧化性进行了系统性的研究,但红茶菌发酵后酒体酒精生成量较低且在发酵过程中由于其他菌种发酵产生大量有机酸,风味不佳。

发酵动力学可对实验过程进行定量分析,对发酵过程放大的实验指标进行较为准确的预测。本实验采用经典模型中的Logistic模型、SGompertz模型和DoseResp模型对红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中,乙醇体积分数的生成与还原糖质量浓度的消耗及酵母菌活菌数的生长等实验数据进行非线性拟合,建立发酵动力学模型,通过发酵动力学分析,为红茶菌液水蜜桃果酒的发酵生产控制提供理论支持。并跟踪监测红茶菌液水蜜桃果酒中的两种抗氧化性物质(黄酮和总酚)质量浓度和三种自由基(DPPH、ABTS⁺、羟基)清除率的测定分析,来对其抗氧化性及相关性进行分析,旨在揭示了红茶菌液水蜜桃发酵过程中代谢产物及抗氧化活性

的变化规律,为红茶菌液水蜜桃的工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

水蜜桃,购于信阳市潢川县水蜜桃基地;红茶菌菌膜,济宁市兖州区创客电子商务有限公司;安琪高活性果酒干酵母(SY型),湖北省宜昌市安琪酵母股份有限公司;茶叶(信阳毛尖),信阳市清饮茶叶有限公司;食用一级白糖(食品级),郑州市凯龙食品有限公司;果胶酶(酶活力 1×10^6 U/g),河南万邦实业有限公司。

1.2 主要仪器与设备

A390紫外分光光度计,翱艺仪器(上海)有限公司;DZKW-D-2电热恒温水浴锅,北京市永光明医疗仪器有限公司;SPX-250B III电热恒温生化培养箱,北京科伟永兴仪器制造有限公司;UB100i生物双目显微镜,北京荣兴光恒技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 红茶菌液的制备

取准备好的红茶菌菌膜,放入玻璃发酵罐中,加入已放凉的糖茶水,28℃下静置发酵,待发酵液长出厚度3 mm的新菌膜时停止发酵,过滤,并对其进行高压灭菌处理,用干净无菌的容器装好备用。

1.3.2 工艺流程及要点

工艺流程:

对发酵过程中酵母菌生长的变化曲线进行拟合^[13], 相关系数分别为 0.984 8、0.983 0 和 0.974 2, 酵母菌生长量的拟合方程及其相关系数如表 1 所示。

表 1 酵母菌生长量的拟合方程及其相关系数

Table 1 The fitting equation and correlation coefficients of yeast cell number

模型	拟合方程	相关系数 R^2
Logistic	$Y = 16.1 + \frac{0.13 - 16.1}{1 + (\frac{x}{96.14})^{4.17}}$	$R^2 = 0.983\ 0$
SGompertz	$Y = 15.83 \times e^{-e^{-0.03(x-83.28)}}$	$R^2 = 0.984\ 8$
Boltzmann	$Y = \frac{-1 - 15.49}{(x - 92.26)^{24.17}} + 15.49$	$R^2 = 0.974\ 2$

发酵过程中 SGompertz 模型的 $R^2 = 0.984\ 8$ 相关系数最高, 说明该模型可较好地描述红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中酵母数量增长的动态过程^[14], 故选用 SGompertz 模型对红茶菌液水蜜桃果酒中酵母菌的生长情况进行拟合, 其原始方程如下所示:

$$Y = a \times e^{-e^{-k(x-x_c)}} \quad (1)$$

式中:

Y —酵母菌生长量, $\times 10^7$ CFU/mL;

a —最大菌数与初始菌数的差值, $\times 10^7$ CFU/mL;

k —在时间 x_c 的相对生长速率;

x —发酵时间, h;

x_c —达到相对最大生长速率所需的时间, h。

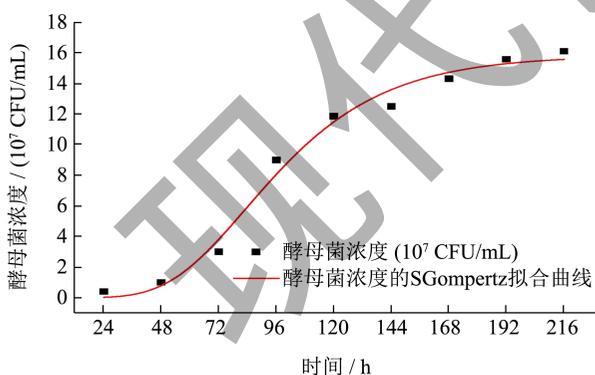


图 2 发酵过程中酵母菌浓度变化拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of yeast concentration change during fermentation

采用 SGompertz 模型对红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中酵母菌浓度变化进行拟合并对试验结果分析, 酵母菌浓度变化拟合曲线如图 2 所示: 酵母菌经过 48 h 的适应期后, 在发酵过程的第 48 小时至第 120 小时内浓度迅速升高, 这一过程为对数期, 自 144 h

后开始趋于平稳, 逐步进入稳定期。通过 Origin 2021 软件对菌体数量和方程式进行拟合, 得 $a=15.83$, $k=0.03$, $x_c=83.28$, 代入式中, 得酵母菌生长随发酵过程变化的动力学模型式为 $Y=15.83 \times e^{-e^{-0.03(x-83.28)}}$

2.1.3 乙醇生成动力学模型的建立

乙醇生成量的拟合方程及其相关系数如表 2 所示。用 Boltzmann、Logistic 和 SGompertz 三种模型对发酵过程中乙醇生成量的变化曲线进行拟合^[15], 相关系数分别为 0.987 8、0.980 4 和 0.976 0。

红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中 Boltzmann 模型的 $R^2=0.987\ 8$, 表明 Boltzmann 模型的相关系数最高, 能较好地反映乙醇生成量的变化情况, 说明该模型可较好地描述红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中乙醇生成量增长的动态过程, 故选用 Boltzmann 模型对红茶菌液水蜜桃果酒中乙醇的生成情况进行拟合, 其原始方程如下所示:

$$Y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2 \quad (2)$$

式中:

Y —发酵过程中乙醇生成量, %vol;

A_1 —初始乙醇体积分数;

A_2 —最终乙醇体积分数, %vol;

x —发酵时间, h;

x_0, dx —方程系数。

表 2 乙醇生成拟合方程及其相关系数

Table 2 The fitting equation and correlation coefficients of alcohol formation

模型	拟合方程	相关系数
Boltzmann	$Y = \frac{0.2 - 9.1}{1 + e^{\frac{(x-76.2)}{12.39}}} + 9.1$	$R^2 = 0.987\ 8$
Logistic	$Y = 9.13 + \frac{0.57 - 9.13}{1 + (\frac{x}{76.99})^{7.26}}$	$R^2 = 0.980\ 4$
SGompertz	$Y = 9.2 \times e^{-e^{-0.05(x-65.95)}}$	$R^2 = 0.976\ 0$

采用 Boltzmann 经典模型对红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中乙醇生成量变化进行拟合并对试验结果分析, 乙醇生成量变化拟合曲线如图 3 所示, 结合图 2, 乙醇的生成与酵母菌的生长曲线基本同步。酵母菌在 48 h 的适应期内, 乙醇生成量增长较慢; 在发酵过程的第 48 小时至第 120 小时内酵母菌浓度迅速升高, 这一过程为对数期, 在此期间酵母菌利用糖代谢快速生成乙醇, 乙醇生成量增长速度较

快, 在第 120 小时达到峰值为 9.4%vol; 自 120 h 后乙醇生成量开始趋于平稳, 逐步进入稳定期。通过 Origin 2021 软件对乙醇生成量和方程式进行拟合, 得 $A_1=0.2$, $A_2=9.1$, $x_0=76.2$, $dx=12.39$, 代入式中, 得乙醇生成量随发酵过程变化的动力学模型式为:

$$Y = \frac{0.2-9.1}{1+e^{\frac{(x-76.2)}{12.39}}} + 9.1$$

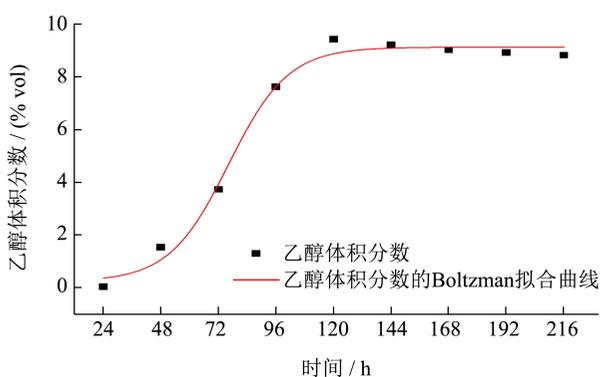


图 3 发酵过程中乙醇生成量拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of ethanol production during fermentation

2.1.4 还原糖消耗动力学模型的建立

红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中, 还原糖在果酒发酵过程中主要的作用是作为能源物质, 提供酵母生长所需的碳源, 适当改进果酒口感^[16]。故其模型属于底物基质消耗, 还原糖是酵母菌生长代谢的物质基础, 又涉及乙醇的生成。在微生物发酵过程中, 主要消耗在三个方面: 一是用于酵母菌的生长与增殖, 二是用于合成代谢产物(主要为乙醇), 三是提供酵母菌生命活动的能量^[17]。

分别用 DoseResp、Boltzmann 和 Logistic 三种模型对发酵过程中还原糖消耗的变化曲线进行拟合, 相关系数分别为 0.991 1、0.991 0 和 0.989 4。还原糖质量浓度的拟合方程及其相关系数如表 3 所示。

表 3 还原糖消耗拟合方程及其相关系数

Table 3 The fitting equation and correlation coefficients of reducing sugar consumption

模型	拟合方程	相关系数
DoseResp	$Y = 18.42 + \frac{8\,253.06 - 18.42}{1 + 10^{0.008(-203.86 - x)}}$	$R^2=0.991\,1$
Boltzmann	$Y = \frac{8\,087.53 - 18.42}{1 + e^{\frac{(x-202.74)}{52.38}}} + 18.42$	$R^2=0.991\,0$
Logistic	$Y = 8.97 + \frac{157.58 - 8.97}{1 + (\frac{x}{49.24})^{1.69}}$	$R^2=0.989\,4$

红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中 DoseResp 模型的 $R^2=0.991\,1$, 表明 DoseResp 模型的相关系数最高, 能较好地反映还原糖质量浓度的变化情况, 说明该模型可较好地描述红茶菌水蜜桃果酒发酵过程中还原糖质量浓度消耗的动态过程, 故选用 DoseResp 模型对红茶菌水蜜桃果酒中还原糖消耗情况进行拟合。其原始方程如下所示:

$$Y = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + 10^{p(\log x_0 - x)}} \quad (3)$$

式中:

Y—发酵过程中还原糖质量浓度, g/L;

A_1 —最终还原糖质量浓度, g/L;

A_2 —初始还原糖质量浓度, g/L;

x—发酵时间, h;

$\log x_0$ 、p—方程系数。

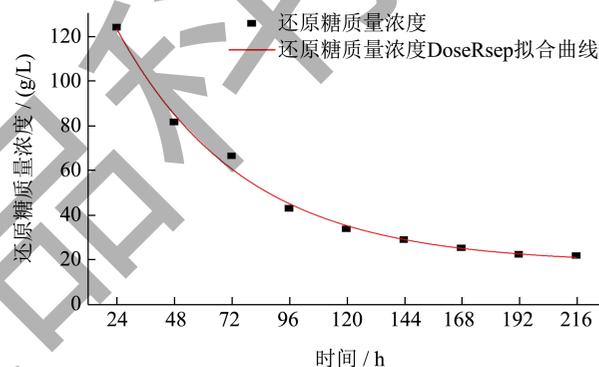


图 4 发酵过程中还原糖消耗拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of reducing sugar consumption during fermentation

采用 DoseResp 经典模型对红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中还原糖质量浓度变化进行拟合并对试验结果分析, 还原糖质量浓度变化拟合曲线如图 4 所示。分析图 4 与图 2 可知, 还原糖的消耗与酵母菌的生长曲线恰好呈现了相反的趋势^[18]。在发酵过程的前 120 h 内还原糖质量浓度迅速下降, 酵母菌浓度迅速升高, 说明酵母菌生长繁殖迅速^[19], 这一段时间正处于发酵期间, 自 120 h 后还原糖质量浓度开始趋于平稳, 逐步进入稳定期, 还原糖质量浓度稳定在 21.94 g/L, 发酵结束。在实际生产过程中, 可以使用糖度计测定残糖含量, 通过残糖含量来判断红茶菌水蜜桃果酒发酵是否结束^[20]。通过 Origin 2021 软件对乙醇生成量和方程式进行拟合, 得 $A_1=18.42$, $A_2=8\,253.06$, $\log x_0=-203.86$, $p=-0.008$, 代入式中, 得还原糖质量浓度随发酵过程变化的动力学模型式为: $Y=18.42 + \frac{8\,253.06 - 18.42}{1 + 10^{-0.008(-203.86 - x)}}$

表 4 模型汇总和参数估计值

Table 4 Summary of models and parameter estimates

序号	方程	R^2	F	df_1	df_2	Sig.	b_0	b_1	b_2	b_3
A	二次项	0.993 0	445.035	2	6	0.000	-0.164	1.376	-0.051	0.000
	三次项	0.993 0	247.742	3	5	0.000	-0.190	1.404	-0.055	
B	二次项	0.948 0	54.504	2	6	0.000	13.320	-0.175	0.010	3.979E-005
	三次项	0.994 0	264.472	3	5	0.000	5.143	0.324	-0.080	
C	二次项	0.910 0	30.476	2	6	0.001	107.236	-10.676	0.344	-0.073
	三次项	0.943 0	27.726	3	5	0.002	119.367	-23.718	2.262	

注: A 因变量: 乙醇体积分数, 自变量: 酵母菌浓度; B 因变量: 乙醇体积分数, 自变量: 还原糖质量浓度; C 因变量: 还原糖质量浓度, 自变量: 酵母菌浓度。

2.1.5 发酵动力学参数数学回归方程的建立

对酵母菌浓度、乙醇体积分数和还原糖质量浓度进行两两曲线回归分析, 探究其三者之间的变化规律, 最后得到的结果如表 4、图 5 所示。

曲线回归模型的拟合结果, 通过实测值与模型拟合值差值的平方和最小时的模拟参数, 得到最佳的回归函数表达式, 可以通过比较决定系数的大小分析各模型的优劣, 通过高次项的建立, 对实际数据进行逼近。决定系数越大, 则模型越优。表明真实数据和预测结果之间的拟合度越高, 方程表示的规律越符合实际。

乙醇体积分数 (Y) 与酵母菌浓度 (X) 的二次多项式决定系数 R^2 为 0.993 0 与三次多项式决定系数 R^2 相同, 但对比两者的 F 值发现二次多项式的 F 值远大于三次多项式的 F 值, 故选用二次多项式模型: $y = -0.164 + 1.376x - 0.051x^2$ 来预测乙醇体积分数和酵母菌浓度发酵过程中的总体趋势和特征。

乙醇体积分数 (Y) 与还原糖质量浓度 (X) 的二次多项式决定系数 R^2 为 0.948 0, 三次多项式决定系数 R^2 为 0.994 0, 故选用三次多项式模型: $y = 5.143 + 0.324x - 0.08x^2 + 0.000\ 039\ 79x^3$ 来预测乙醇体积分数与还原糖质量浓度发酵过程中的总体趋势和特征。

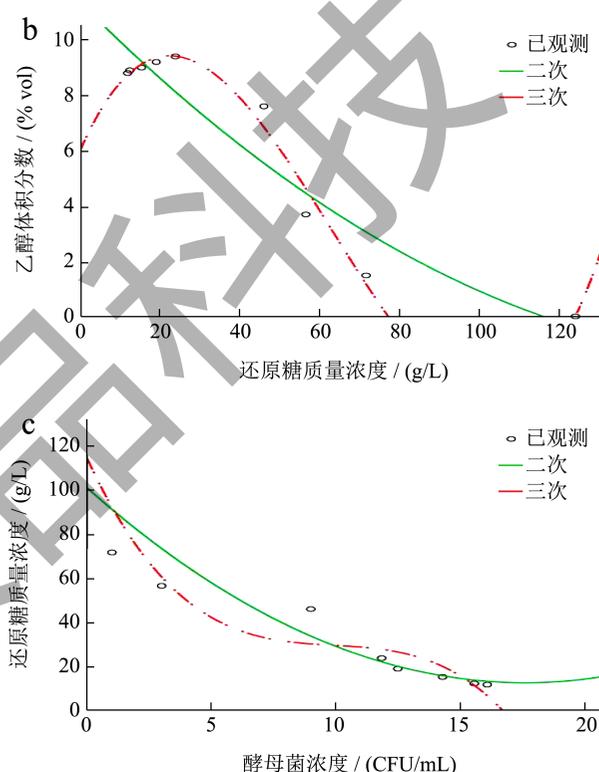
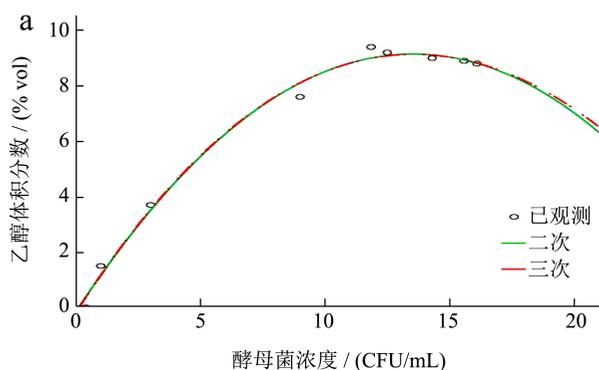


图 5 酵母菌浓度、乙醇体积分数和还原糖质量浓度两两曲线回归拟合图

Fig.5 Pairwise curve regression fit of yeast concentration, alcohol, and reduced sugar content

还原糖质量浓度 (Y) 与酵母菌浓度 (X) 的二次多项式决定系数 R^2 为 0.910 0, 三次多项式决定系数 R^2 为 0.943 0, 故选用三次多项式模型: $y = 119.367 - 23.718x + 2.262x^2 - 0.073x^3$ 来预测还原糖质量浓度与酵母菌浓度发酵过程中的总体趋势和特征。

2.2 抗氧化性的测定与分析

2.2.1 红茶菌液水蜜桃果酒中总酚和黄酮质量浓度的测定

由图 6 可知, 红茶菌液水蜜桃果酒的总酚质量浓度在发酵过程中呈现先上升后下降的趋势^[21]。主

要上升阶段集中在 48 h 至 192 h 内, 此阶段为主发酵阶段, 出汁量比较多, 酚类物质从发酵皮渣及原料液中浸提释放出来溶解在酒体中, 使得总酚质量浓度不断增加, 在第 192 h 总酚质量浓度达到最高为 3 802 mg/mL。在主发酵结束后, 倒罐导致酒体中混入了一定量的氧气, 使得酚类物质被氧化其含量较快的下降。在后发酵阶段总酚质量浓度开始降低, 随着酵母菌生长繁殖过程代谢产生的酶, 分解了酚类大分子物质使得总酚质量浓度大幅下降^[22]。整个发酵阶段结束后, 总酚质量浓度相对于原料液有所增加。而黄酮质量浓度随时间的变化趋势在整个发酵过程中与总酚质量浓度的变化趋势大致相符, 也是呈现先上升后下降的趋势^[23]。主要上升阶段也是集中在发酵开始后的 48 h 至 192 h 内, 主发酵阶段因为原料液出汁量不断增加使得黄酮的溶解量也大量增加, 在第 192 h 黄酮质量浓度达到最高为 549 mg/mL。整个发酵阶段结束后, 黄酮质量浓度相对于原料液的增加量较于总酚质量浓度相对于原料液的增加量远远要多。因为总酚质量浓度是多种酚类物质含量的总和, 所以总体数值上相对于黄酮质量浓度来说要大得多。

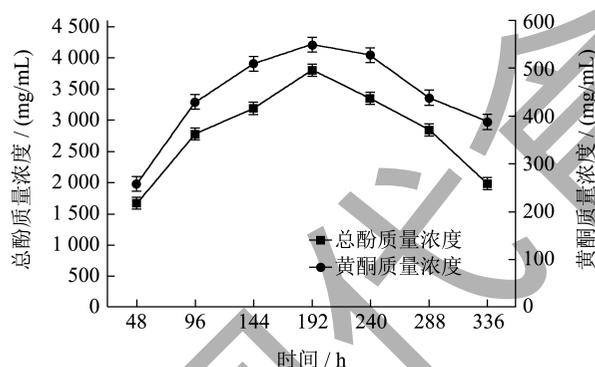


图 6 红茶菌水蜜桃果酒发酵过程中总酚和黄酮质量浓度变化

Fig.6 Changes in total enolic and flavonoids content during fermentation of black tea fungus peach fruit wine

2.2.2 发酵过程中 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺ 自由基清除率和羟基自由基清除率的变化

由图 7 可知, 红茶菌液水蜜桃果酒中的 DPPH 值自由基清除率在发酵过程中呈现先上升后下降的趋势^[24]。主要上升阶段在发 48 h 至 192 h 内, 此阶段为主发酵阶段, 出汁量比较多, 发酵液中的抗氧化性物质被大量的释放出来, 抗氧化性物质含量增加, 抗氧化性升高, 使得 DPPH 自由基清除率呈现出一个较为迅速的上升趋势, 在第 192 小时达到最高 86.73%。随后在后发酵阶段, 因为倒罐的操

作和发酵过程中产生的酶使得酚类物质被氧化和分解, 以及黄酮的不稳定性, 导致酒液中的抗氧化性物质含量开始降低, 抗氧化性降低, 使得 DPPH 自由基清除率也随之缓慢下降, 整个发酵阶段结束后, DPPH 自由基清除率相对于发酵刚开始时有所增加。ABTS⁺ 自由基清除率的变化趋势与 DPPH 自由基清除率的变化趋势大致一样, 总体呈现先上升后下降的趋势^[25], 在第 192 小时 ABTS⁺ 自由基清除率达到最高为 81.87%。随后因为相同的原因导致酒液中的抗氧化性物质含量降低, 抗氧化性降低, 使得 ABTS⁺ 自由基清除率也随之降低。同样在整个发酵阶段结束后, ABTS⁺ 自由基清除率相对于发酵刚开始时有所增加。而羟基自由基清除率的变化趋势与前两者相同, 总体上也呈现出先上升后下降的趋势, 在第 192 h 羟基自由基清除率达到最高为 82.45%。随后因为相同的原因导致酒液中的抗氧化性物质含量降低, 抗氧化性降低, 使得羟基自由基清除率也随之降低。较于发酵刚开始时, 在整个发酵阶段结束后红茶菌液水蜜桃果酒的羟基自由基清除率有所增加。对三种自由基清除率的变化波动进行对比, 发现 DPPH 自由基清除率的变化波动最大, ABTS⁺ 自由基清除率的变化波动次之, 羟基自由基清除率的变化波动最小。

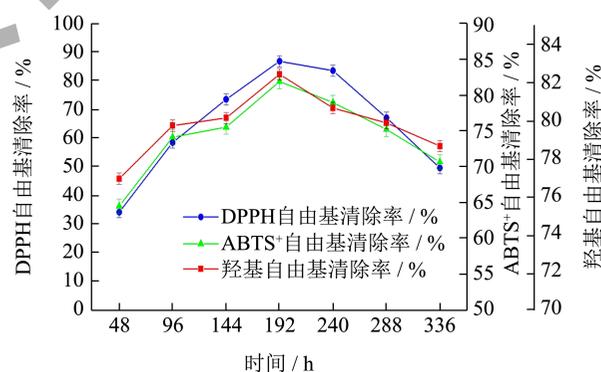


图 7 发酵过程中 DPPH 值自由基清除率、ABTS⁺ 自由基清除率和羟基自由基清除率变化

Fig.7 Changes in DPPH radical clearance, ABTS⁺ radical clearance, and hydroxyl radical clearance during fermentation

3 结论

对发酵动力学数据进行非线性拟合, 以 SGompertz 模型建立了 R^2 为 0.984 8 的酵母菌生长动力学模型, 以 Boltzmann 模型建立了 R^2 为 0.987 8 的乙醇生成动力学模型, 以 DoseResp 模型建立了 R^2 为 0.991 1 的还原糖消耗动力学模型, 试验数据与三个动力学模

型的拟合曲线之间的拟合度较高,较好的体现了发酵过程中的动力学特性,也表明了真实数据和预测结果之间的拟合度越高,所建立方程规律符合实际。前期团队成员孙鹤^[26]已对红茶菌水蜜桃酒的发酵工艺进行优化,通过本文发酵过程动力学研究,可更准确地对实验指标进行预测,并可利用小实验得到数据设计大型的发酵工艺,为红茶菌液水蜜桃果酒发酵过程中的工艺控制提供理论基础。鉴于选用的酵母为安琪果酒酵母,下一步可研究对比猕猴桃筛选酿酒酵母、果酒通用酵母及其他商用果酒酵母的发酵动力学,为红茶菌液水蜜桃果酒大罐发酵筛选发酵性能更加优异的菌种。

两种抗氧化物质含量进行分析,结果表明两种抗氧化物质含量的变化趋势都呈现为先上升后下降,都在第192小时达到峰值,总酚质量浓度达到最高为3802 mg/mL,黄酮质量浓度达到最高为549 mg/mL。对三种自由基清除率进行测定分析,结果表明三种自由基清除率的变化趋势都呈现为先上升后下降,在研究中红茶菌水蜜桃酒DPPH自由基清除率的变化波动最大,ABTS⁺自由基清除率的变化波动次之,羟基自由基清除率的变化波动最小。但都在第192小时达到峰值,DPPH自由基清除率达到最高为86.73%,ABTS⁺自由基清除率达到最高为81.87%,与羟基自由基清除率达到最高为82.45%。因此,发酵第192小时这个时间点可作为判定红茶菌液水蜜桃酒主发酵结束的依据,能够为红茶菌液水蜜桃酒的工业化生产提供理论依据。

参考文献

- [1] 朱菲,郑云峰,江凯,等.干型水蜜桃果酒酿造工艺研究[J].食品与发酵科技,2019,55(6):70-73.
- [2] 康孟利,林旭东,凌建刚,等.干白水蜜桃酒发酵关键工艺研究[J].食品研究与开发,2010,31(10):98-100.
- [3] 王毓宁,李鹏霞,胡花,等.水蜜桃果酒生产工艺研究[J].酿酒,2012,39(4):76-77.
- [4] 王利平.红茶菌酒生产工艺及保健功效的研究进展[J].食品安全导刊,2021,19:141-142.
- [5] 熊亚,李敏杰.红茶菌酒发酵动力学模型的建立及抗氧化性研究[J].食品科技,2020,45(11):90-95.
- [6] 孙永康,卢琴琴.红茶菌酒的研制[J].中国酿造,2015,34(1):172-175.
- [7] 苏龙,吕凤丹,王雪儒,等.响应面优化杨梅果酒发酵工艺及其抗氧化性[J].食品工业科技,2017,38(20):146-151.
- [8] 丁明玉,赵纪萍,李擎阳,等.贯叶金丝桃提取物中总黄酮的测定方法[J].分析实验室,2001,20(6):45-47.
- [9] 闫胜楠.软枣猕猴桃果酒最适工艺条件和抗氧化性的研究[D].吉林:延边大学,2016.
- [10] 李雪,白新鹏,曹君,等.仙人掌果酒发酵动力学及其抗氧化性[J].食品科学,2017,38(4):87-92.
- [11] 赵谋明,董红竹,林恋竹.八种水果多酚的定量分析与抗氧化活性研究[J].现代食品科技,2017,33(10):225-236.
- [12] 薛桂新.蓝靛果蓝莓复合果酒抗氧化能力的研究[J].中国酿造,2014,33(12):112-115.
- [13] 李敏杰,熊亚.红茶菌芒果复合酒的发酵动力学模型及其抗氧化活性[J].现代食品科技,2020,36(12):220-226.
- [14] RIVAS A M, PAREDES I, GUERRERO K. Kinetic model of *Clostridium beijerinckii*'s acetone-butanol-ethanol fermentation considering metabolically diverse cell types [J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, 342(6): 1-12.
- [15] JONG K L, HA E B. Dynamic Modeling of acetone-butanol-ethanol fermentation with ex situ butanol recovery using glucose/xylose mixtures [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 59(6): 2581-2592.
- [16] 孙时光,左勇,张诗琪,等.基于发酵动力学模型的桑椹果酒发酵过程中抗氧化活性[J].食品工业,2019,40(8):146-151.
- [17] 张琪,宋立斌,朱丹,等.黑加仑果酒发酵动力学研究[J].中国酿造,2020,39(2):125-128.
- [18] 赵现华,李翠霞,李华.共发酵对蛇龙珠葡萄酒发酵动力学和香气成分的影响[J].中国酿造,2019,38(7):48-53.
- [19] 李静雯,张东亚,陆洋,等.低度米酒发酵工艺优化及发酵动力学模型建立[J].酿酒科技,2021,8:58-64.
- [20] 毛亚玲,李俊娥,于静,等.酒球菌和酿酒酵母共接种发酵动力学模型建立[J].食品科学,2023,44(2):156-164.
- [21] 李帅康,姜振浩,王一婷,等.结球红菊苣多糖的分离纯化和结构分析及抗氧化活性测定[J].食品科技,2021,12:191-197.
- [22] 张桂芳,张东杰,鹿保鑫,等.不同萌发时间黑豆芽总黄酮含量及DPPH自由基清除能力的测定[J].食品科技,2020,45(12):39-45.
- [23] 侯金丽.刺梨植物乳杆菌发酵饮料的研制及其抗氧化作用[J].食品科技,2022,47(2):140-146.
- [24] 金海炎,王丰园,鲁云凤,等.混菌发酵猕猴桃果酒工艺条件优化及抗氧化性研究[J].食品与发酵工业,2022,48(3):177-185.
- [25] 温红瑞,贾英健,李晓双,等.槲皮万寿菊素抗氧化性的研究[J].饲料工业,2022,5:51-54.
- [26] 孙鹤,刘晓媛,张阳阳,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.