

# 红茶菌芒果复合酒的发酵动力学模型及其抗氧化活性

李敏杰, 熊亚

(攀枝花学院生物与化学工程学院, 攀枝花市干热河谷特色生物资源开发四川省高校重点实验室, 四川攀枝花 617000)

**摘要:** 本文以红茶菌发酵液和芒果汁为原料, 酿制出红茶菌芒果复合果酒, 对其抗氧化性进行测定并建立红茶菌芒果复合果酒发酵动力学模型。对果酒的抗氧化性测定试验表明: 总酚含量、DPPH 及羟基自由基清除率随发酵时间的变化趋势总体上均呈现出先上升再下降的趋势, 在发酵第 8 d, 均达到最高值, 总酚含量、DPPH 和羟基自由基清除率分别为 799.61 mg/mL、92.50%、86.30%。用 SGompertz 模型建立了酵母菌生长动力学模型, 相关系数  $R^2=0.98$ ; 用 Boltzmann 方程建立了总糖消耗动力学模型, 用 Logistic 模型建立了酒精生成动力学模型, 相关系数  $R^2$  均  $>0.99$ , 动力学模型的建立实验结果表明实验值和模型预测值的拟合度很高, 能很好的反映红茶菌芒果复合果酒在发酵过程中的动力学特征。红茶菌芒果复合酒发酵过程中抗氧化活性呈峰型变化, 为红茶菌芒果复合酒发酵提供了参考。

**关键词:** 红茶菌; 芒果; 复合酒; 发酵动力学模型; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2020)12-220-226

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.12.0655

## The Fermentation Kinetic Model and Antioxidant Activity of Kombucha-mongo Complex Wine

LI Min-jie, XIONG Ya

(Department of Biological and Chemical Engineering, Panzhihua University, Key Laboratory of Dry-hot Valley Characteristic Bio-resources Development at University of Sichuan Province, Panzhihua 61700, China)

**Abstract:** Kombucha fermentation broth and Mongo juicy were used as raw materials to produce the Kombucha-Mongo complex wine. Antioxidant activities and fermentation kinetic model of the Kombucha-Mongo complex wine were investigated. The results of antioxidant activity showed that the contents of total polyphenol, DPPH: scavenging rate and Hydroxyl radicals scavenging rate were all increased firstly and then decreased, and their maximums were 799.61 mg/mL, 92.50% and 86.30% on the 8th day, respectively. Based on the SGompertz equation, fermentation kinetics model of growth of yeast was built, and the correlation coefficients was 0.98. The fermentation kinetics models of total sugar consumption, alcohol formation were built based on the Boltzmann equation and the Logistic equation, respectively, and their correlation coefficients were both more than 0.99. According to the non-linear fitting, the experimental values of the models had a good accordance with the predicted values, which could reflect the static dynamic characteristics of the Kombucha-Mongo complex wine fermentation very well, and the change in antioxidant activity of the Kombucha-Mango complex wine showed a peak type during fermentation, which could be provided as the theoretical basis for the fermentation of Kombucha mango complex wine.

**Key words:** Kombucha; mongo; compound wine; kinetic models; antioxidant activity

引文格式:

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

LI Min-jie, XIONG Ya. The fermentation kinetic model and antioxidant activity of Kombucha-mongo complex wine [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(12): 220-226

收稿日期: 2020-07-14

基金项目: 干热河谷特色生物资源开发四川省重点实验室开放基金资金项目 (GR-2019-E03)

作者简介: 李敏杰 (1976-), 男, 教授, 研究方向: 发酵

通讯作者: 熊亚 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 发酵、应用微生物学

红茶菌是以茶糖水为原料, 通过酵母菌、乳酸菌、醋酸菌发酵而形成的复合菌共生体, 红茶菌发酵液中富含各种有机酸、D-葡萄糖二酸-1,4 内酯、D-葡萄糖二酸、微量元素、茶多酚、蛋白质、氨基酸、维生素以及酚类等抗氧化性物质, 具有降低胆固醇、抗癌及清胃保肝等保健作用<sup>[1-5]</sup>。孙永康等<sup>[6]</sup>曾在红茶菌发酵

液中添加酵母菌酿得红茶菌酒, 并对其发酵工艺进行了优化, 然而单一红茶菌发酵液发酵后的红茶菌酒酒精度含量较低, 虽经过酵母菌、醋酸菌及乳酸菌共同发酵后的红茶菌发酵液进行红茶菌酒发酵能在一定程度上抑制杂菌的污染, 但由于红茶菌发酵过程中产生了大量有机酸, 使口味偏酸, 显得风味较为单一。芒果是攀枝花特色水果, 充足的阳光赋予攀枝花芒果纤维少、糖分高、果香浓郁、营养丰富的优良品质<sup>[7-9]</sup>, 目前关于芒果发酵的产品越来越多, 发酵工艺也日趋成熟, 已有很多报道<sup>[10-12]</sup>。将芒果汁与红茶菌发酵液混合进行发酵酿酒, 恰好可以改善单一红茶菌发酵酒风味单一且口感偏酸的缺点。

在发酵过程中, 微生物的生长、基质的消耗及产物的形成都和微生物的新陈代谢活动相关, 这种相关性可以通过发酵动力学来进行探讨<sup>[13]</sup>, 它利用发酵动力学数据来建立数学模型, 利用模型公式对微生物生长、基质消耗及产物形成的规律进行直观表示, 可为发酵工业的工艺改进提供参考<sup>[14]</sup>。目前关于红茶菌芒果发酵酒发酵动力学及其抗氧化性还未见报道。通过本实验建立红茶菌芒果复合果酒发酵动力学模型, 进行抗氧化活性测定, 为红茶菌芒果复合果酒的市场化开发提供参考, 对开拓复合酒种类、开发红茶菌及芒果市场资源具有重要意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

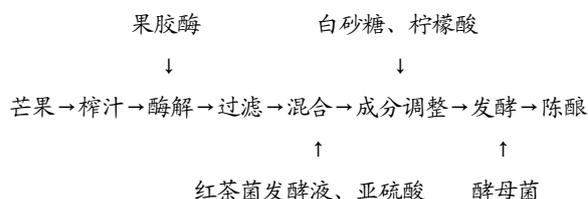
红茶菌菌膜, 购于宏圣堂网购企业店; 芒果(“金煌芒”), 购于攀枝花九附六菜市场, 产地位于攀枝花市仁和区中坝; 安琪高活性酵母, 湖北宜昌安琪酵母股份有限公司; 果胶酶(30万U/g), 浙江博丹衡食品配料有限公司; 亚硫酸(99.8%)、没食子酸(>99.9%)、柠檬酸、硝酸铝、氢氧化钠、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、水杨酸、碳酸钠、DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼), 双氧水(30%), 购自天津致远化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

FA1004T 电子天平, 渡扬精密仪器(上海)有限公司; SZ6000B 型显微镜, 江苏仪征市诚信微生物制品厂; PHS-25 型 pH 计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; WAY-32 手持式糖量折光仪, 北京盟创伟业科技有限公司; HH-M8 八孔恒温水浴锅, 上海赫田科学仪器有限公司; T2264MD 榨汁机, 上海九阳股份有限公司; 0-25 型酒精计, 河间市宏利玻仪厂; 722s 可见光分光光度计, 山东潍坊盛翔实验设备有限公司。

## 1.3 方 法

### 1.3.1 工艺流程及操作要点



操作要点:

(1) 原料预处理: 芒果破碎、去核, 并将去核芒果放入榨汁机榨汁。

(2) 红茶菌发酵液: 取两片红茶菌菌膜(约 20 g)放入玻璃发酵罐中, 加入 300 mL 冷却后的红茶糖水(于 350 mL 水中加入 2 g 红茶和 30 g 白砂糖, 熬煮后过滤), 28 °C 下静置发酵, 待液面长出新菌膜, 厚度大概为 3 mm 时停止发酵, 过滤出红茶菌发酵液备用。

(3) 酶解: 将芒果去核, 果肉打碎榨汁, 加入 50 mg/L 果胶酶, 于 60 °C 的恒温水浴锅中酶解 24 h。果胶酶有助于芒果中果胶的分解, 提高出汁率。

(4) 混合: 将芒果汁与红茶菌发酵液以体积比 1:2 的比例混合, 加入 60 mg/L  $\text{SO}_2$  以防止杂菌污染。

(5) 成分调整: 发酵前要对红茶菌发酵液和芒果汁的混合液进行糖度、酸度调整。加入白砂糖, 调整初始糖度为 220 g/L; 加入柠檬酸调节酸度为 5 g/L。

(6) 发酵: 加入 0.5% (m/v) 的活性干酵母, 在 28 °C 恒温培养箱中发酵 13 d。发酵期间, 发酵外环境温度均为室温(25 °C 左右),

(7) 陈酿: 陈酿时需加入 100 mg/L 的  $\text{SO}_2$ , 杀死菌体。

### 1.3.2 红茶菌芒果复合发酵酒发酵过程中主要参数的测定

在发酵的 13 d 时间内每天进行酒液酒精含量、总糖及酵母菌数量的测定。

(1) 酒精度的测定

采用蒸馏法<sup>[15]</sup>对酒精含量进行测定。

(2) 总糖的测定

采用 3,5-二硝基水杨酸比色法(DNS 法)<sup>[16]</sup>。利用 3,5-二硝基水杨酸比色法求得的标准回归方程曲线为  $y = 0.61x + 0.02$ ,  $R^2 = 0.99$ , 利用回归方程带入吸光度值求得总糖含量。

(3) 酵母菌数量测定

采用血球计数板法测定。

### 1.3.3 红茶菌芒果酒发酵过程中抗氧化活性的测定

(1) DPPH 自由基的清除能力的测定

红茶菌芒果酒 DPPH 清除率, 根据 Kilani 法<sup>[17,18]</sup>测定。

$$\text{DPPH清除率}/\% = \left(1 - \frac{A-B}{A_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A_0$  为 2 mL 乙醇加上 4 mL DPPH 溶液的吸光值; B 为 2 mL 样品液加上 4 mL 乙醇的吸光值; A 为 2 mL 样品液加上 4 mL DPPH 溶液的吸光值。

(2) 多酚含量的测定

绘制标准曲线<sup>[19]</sup>: 称取没食子酸 0.01 g 到 100 mL 容量瓶中, 用蒸馏水定容至刻度线。分别取 0 mL、1 mL、2 mL、3 mL、4 mL、5 mL、6 mL 标准溶液于 100 mL 容量瓶中, 用蒸馏水定容至刻度线。取 1.0 mL 没食子酸样液于比色管中, 加入蒸馏水 2.0 mL、福林酚 1.0 mL 和 7.5% 碳酸钠溶液 3.0 mL, 在 55 °C 水浴锅中反应 30 min, 在 765 nm 波长下测量吸光度。运用 Origin 8.6 软件进行绘图, 得没食子酸的标准曲线方程为:  $y=1.38x+0.16$ ,  $R^2=0.99$ , 相关性较好, 用于计算红茶菌芒果酒中总酚的含量。

(3) 羟基自由基清除率的测定

采用水杨酸比色法, 测定方法参考文献<sup>[20]</sup>。

$$\text{羟基自由基清除率}/\% = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $A_0$  为对照的吸光度值;  $A_1$  为样品反应体系的吸光度值;  $A_2$  为红茶菌芒果酒本底值的吸光度值。

1.3.4 发酵动力学模型的建立

根据红茶菌芒果酒发酵过程中酵母菌生长量、酒精含量和总糖消耗量建立酵母菌菌体生长、酒精生成和总糖消耗的动力学模型。

1.3.5 数据处理

运用 Origin 8.6 软件进行红茶菌芒果酒发酵过程中酵母菌生长量、酒精含量和总糖消耗量的非线性拟合。通过回归求解动力学模型参数, 建立酵母菌菌体生长、酒精生成和总糖消耗的动力学模型方程。

2 结果与分析

2.1 红茶菌芒果酒抗氧化性

2.1.1 红茶菌芒果酒中总酚含量的测定

由图 1 可知, 在发酵第 1 d 至第 8 d, 红茶菌芒果复合果酒总酚含量在发酵过程中随着发酵时间的增加及酒精含量的逐渐升高, 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, 总酚含量不断增加。在第 8 d 时总酚含量达到最高, 为 799.61 mg/mL。发酵第 8 d 至第 13 d, 由于皮渣分离, 导致酒体中混

入大量氧气, 使多酚类物质被氧化, 导致其含量较快的下降。在第 10 d 至第 13 d, 总酚含量下降趋势减缓, 这可能是因为后期发酵过程中多酚类及黄酮类化合物虽仍在不断浸提溶解出来, 酒液中各种物质之间可能发生如沉淀、氧化还原等反应, 从而导致总酚含量下降, 使抗氧化能力也随之下降。此变化趋势与李雪<sup>[21]</sup>、张琪<sup>[22]</sup>、孙时光等<sup>[23]</sup>研究的仙人掌果酒、沙棘果酒、桑葚果酒抗氧化性测定中总酚含量的变化趋势基本一致。

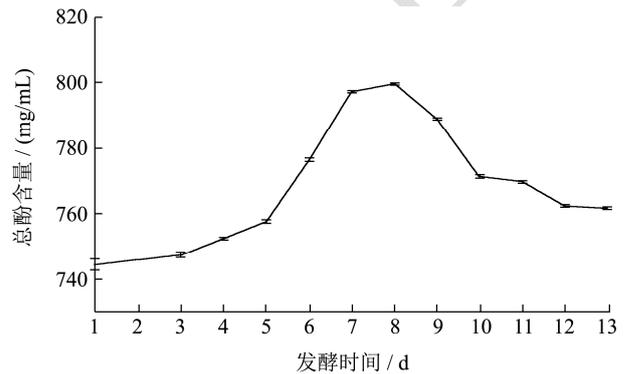


图 1 红茶菌芒果酒发酵过程总酚含量变化

Fig.1 Changes of total polyphenols content during fermentation of Kombucha-mongo compound wine

2.1.2 红茶菌芒果酒对 DPPH 自由基的清除能力

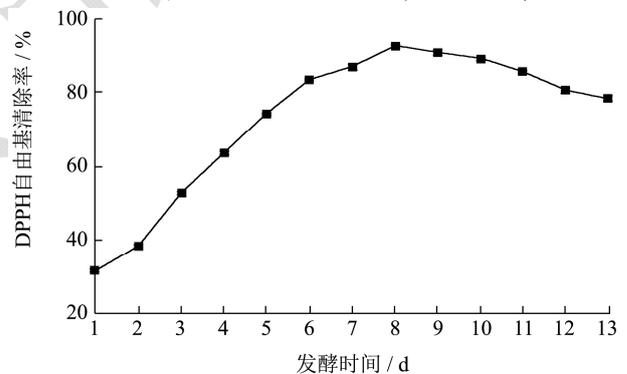


图 2 红茶菌芒果酒发酵过程 DPPH 自由基清除率变化

Fig.2 Changes of DPPH radical scavenging rate during fermentation of Kombucha-mongo compound wine

红茶菌芒果酒发酵过程中 DPPH 自由基清除率变化趋势总体上为先上升, 后下降 (图 2)。在发酵第 1 d 至第 8 d, DPPH 自由基的清除率呈现出一个比较快的上升趋势, 这和总酚含量的变化趋势基本上一致, 在这一段发酵时期, 由于芒果和红茶菌发酵液充分混合, 在酵母菌的作用下, 芒果和红茶菌发酵液中的抗氧化性物质被大量的释放到酒液中, 在发酵第 8 d 时达到最高水平, 此时 DPPH 清除率为 92.50%, 从第 8 d 开始, DPPH 自由基清除率开始下降, 在这一段发酵期间, 多酚物质发生氧化, 含量降低, DPPH 自由基的清除率也随之下降。

### 2.1.3 红茶菌芒果酒对羟基自由基的清除能力

由图3可以看出发酵过程中羟基自由基清除能力随时间的变化关系,发酵第1d至第6d,羟基自由基的清除能力呈明显上升趋势,这是由于芒果、红茶菌发酵液中的各种维生素等具有抗氧化作用的成分不断溶出到酒液中,在第6d时对酒液进行过滤,除去果渣,在过滤过程中因为酒液与空气发生了接触导致酒液的羟基自由基清除能力上升趋势有所减缓,随着发酵的进行酒精度增加,在第8d时羟基自由基的清除率达到最高,为86.30%。从第8d开始,羟基自由基的清除能力开始下降,说明酒体中各种营养成分的含量已经达到最大值,此时因为少量空气的存在使得发酵液中的羟基自由基清除能力不再增加,并且呈趋于稳定的趋势,这种变化趋势与李明月等<sup>[24]</sup>对石榴酒酿造过程中抗氧化性测定时羟基自由基清除率的变化趋势一致。

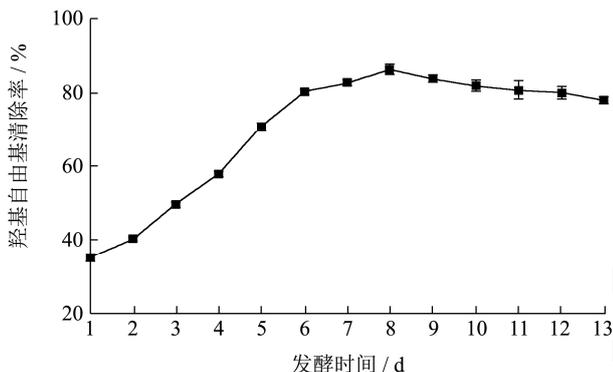


图3 红茶菌芒果酒发酵过程羟基自由基清除率变化

Fig.3 Changes of Hydroxyl radical scavenging rate during fermentation of Kombucha-mongo compound wine

## 2.2 红茶菌芒果酒发酵动力学模型的建立

### 2.2.1 红茶菌芒果酒中菌体量、酒精度、总糖含量的变化情况

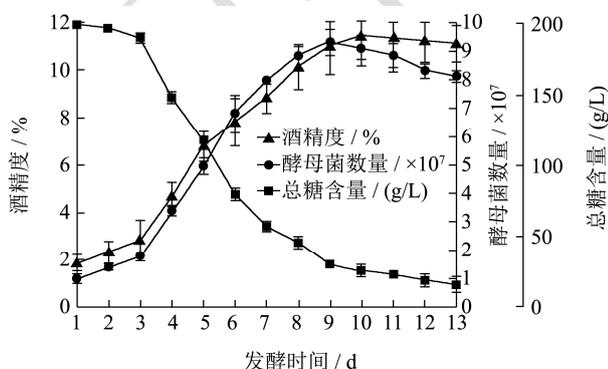


图4 红茶菌芒果酒发酵过程主要指标变化曲线

Fig.4 Change curves of main indexes of Kombucha-mongo compound wine

对红茶菌芒果酒在发酵过程中的酵母菌数量、总

糖含量和酒精度这三个主要指标进行测定,其变化曲线见图4。酵母菌数量在发酵第3d至第9d迅速升高,在第9d达到最高,为 $9.30 \times 10^7$ 个/mL,之后酵母菌数量进入稳定期和衰亡期,体现了酵母菌的生长规律;总糖含量在发酵第3d至第9d下降迅速,从第9d开始,总糖含量变化趋于平缓,总糖含量变化趋势与酵母菌细胞数量的变化趋势一致,随着酵母菌细胞的大量增长,总糖也被快速消耗,随着酵母菌细胞生长进入稳定期和衰亡期,总糖的消耗也逐渐变慢。酒精含量的变化趋势也与酵母菌细胞数量的变化趋势相一致,发酵第1d至第10d,酵母菌细胞数量快速增长,消耗分解红茶菌芒果汁中的各种营养物质,产生大量的酒精,其含量不断增加,在第10d时达到最高,为11.40%,之后随着酵母生长进入到稳定期和衰亡期,产酒精作用逐步减缓,曲线平缓下降。

### 2.2.2 酵母菌生长动力学模型的建立

酵母菌生长动力学模型的建立见表1。

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 <sup>2</sup>
Logistic	$Y = 8.54 - \frac{7.32}{1 + \left(\frac{x}{4.86}\right)^{3.72}}$	0.9789
SGompertz	$Y = 8.69 \times e^{-e^{-0.57 \times (x - 3.72)}}$	0.9841
Boltzmann	$Y = 8.47 - \frac{7.54}{1 + e^{\frac{x - 4.83}{0.93}}}$	0.9591

Logistic、SGompertz 和 Boltzman 是三种典型的呈“S”型生长曲线的模型,分别用 Logistic、SGompertz 和 Boltzman 三种模型对发酵过程中酵母菌生长量的变化曲线进行拟合,相关系数分别为 0.9789、0.9841 和 0.9591。可见 SGompertz 模型的相关系数最高,能对酵母细胞数量的变化情况进行较好的拟合,这与张琪等<sup>[21]</sup>对沙棘果酒发酵过程中酵母菌生长量动力学方程建立所用模型一致。其原始方程如下方程式(3)所示:

$$Y = a \times \{-\exp[-k(x - x_c)]\} \quad (3)$$

其中: Y 为酵母菌生长量 ( $\times 10^7$ ); a 为最大菌数与初始菌数的差值 ( $\times 10^7$ ); k 为在时间  $x_c$  的相对生长速率; x 表示发酵时间 (d);  $x_c$  为达到相对最大生长速率所需的时间 (d)。

通过 origin 8.6 软件对酵母菌生长量和方程式(3)进行拟合,得  $a=8.69$ ,  $k=0.57$ ,  $x_c=3.72$ 。带入式(3)得总糖消耗随发酵过程变化的动力学模型为:

$$Y = 8.69 \times e^{-e^{-0.57 \times (x - 3.72)}} \quad (4)$$

酵母菌生长量与预测值模拟拟合曲线如图 5。

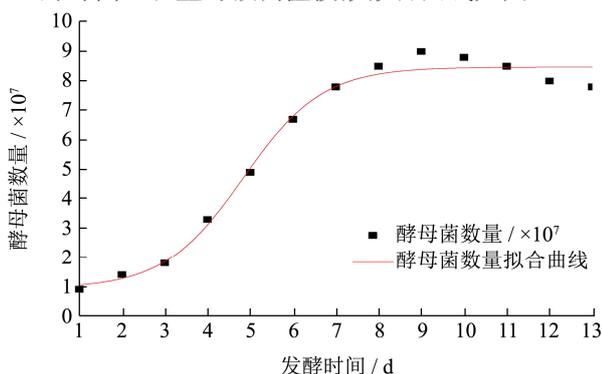


图 5 酵母菌生长实验值与预测值模型拟合曲线

Fig.5 Fitness curve of test values of Yeast growth and prediction values

### 2.2.3 酒精生成动力学模型的建立

酒精生成动力学模型建立的拟合方程及相关系数见表 2。

表 2 酒精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 R <sup>2</sup>
Logistic	$Y = 12.39 - \frac{10.32}{1 + \left(\frac{x}{5.67}\right)^{3.42}}$	0.9926
SGompertz	$Y = 12.81 \times e^{-e[-0.30 \times (x - 3.82)]}$	0.9828
Boltzmann	$Y = 11.98 - \frac{10.62}{1 + e^{\frac{x - 5.30}{1.67}}}$	0.9838

分别用 Logistic、SGompertz 和 Boltzman 三种模型对发酵过程中酒精生成的变化曲线进行拟合，相关系数分别为 0.9926、0.9828 和 0.9838。可见 Logistic 模型的相关系数最高，能对酒精生成的变化情况进行较好的拟合，这与张琪等<sup>[25]</sup>在黑加仑果酒发酵过程中对酒精生成动力学方程所建模型一致。

不同时间的酒精度含量数据，用 origin 8.6 作图软件进行非线性拟合，得到复合果酒生产中产物生成动力学模型为：

$$Y = \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} + A_2 \quad (5)$$

其中：Y 表示发酵过程中的酒精度 (% vol)；A<sub>1</sub> 表示初始酒精度；A<sub>2</sub> 表示最终酒精度；X 表示发酵时间 (d)；X<sub>0</sub>、P 为方程系数。

通过 origin 8.6 软件对发酵过程中酒精度数据和方程式 (5) 进行拟合，得到 A<sub>1</sub>=2.07，A<sub>2</sub>=12.39，

X<sub>0</sub>=5.67，P=3.42，带入式 (5) 得酒精度随发酵过程变化的动力学模型：

$$Y = 12.39 - \frac{10.32}{1 + \left(\frac{x}{5.67}\right)^{3.42}} \quad (6)$$

酒精度产量与预测值模拟拟合曲线如图 6 所示。

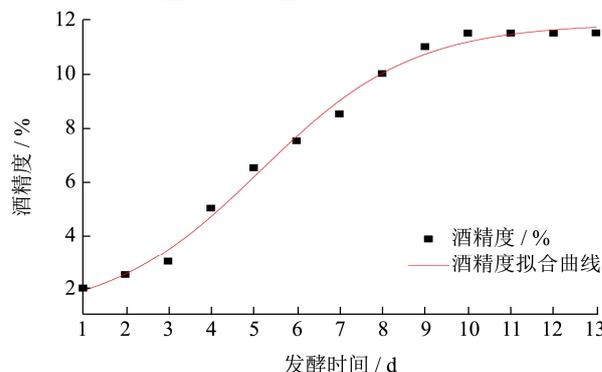


图 6 酒精生成实验值与预测值模型拟合曲线

Fig.6 Fitness curve of test values of alcohol production and prediction values

### 2.2.4 总糖消耗动力学模型的建立

总糖消耗动力学模型建立的拟合方程及相关系数见表 3。

表 3 总糖消耗拟合方程及其相关系数

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

模型	拟合方程	相关系数 R <sup>2</sup>
Logistic	$Y = 20.24 + \frac{277.47}{1 + \left(\frac{x}{5.24}\right)^{4.00}}$	0.9949
DoseResp	$Y = 30.81 + \frac{285.06}{1 + 10^{-0.32 \times (5.06 - x)}}$	0.9949
Boltzmann	$Y = 30.81 + \frac{285.06}{1 + e^{\frac{x - 5.06}{1.35}}}$	0.9978

分别用 Logistic、DoseResp 和 Boltzman 三种模型对发酵过程中总糖消耗的变化曲线进行拟合，相关系数分别为 0.9949、0.9949 和 0.9978。可见三种模型均能对总糖消耗情况进行较好的拟合，Boltzmann 模型的相关系数最高。在建立动力学方程时，复合果酒发酵过程中，总糖的消耗模型包括底物消耗以维持细胞呼吸新陈代谢作用、供给菌体生长、形成产物三部分<sup>[26]</sup>。通过物料平衡，选择 Boltzmann 模型来建立总糖消耗的动力学模型，这与吴树坤等<sup>[27]</sup>在山葡萄酒发酵动力学研究中对总糖消耗动力学方程所建模型一致。其原始方程如下。

$$Y=A_2+\frac{(A_1-A_2)}{1+\exp\left[\frac{(x-x_0)}{dx}\right]} \quad (7)$$

其中: Y 为总糖含量 (g/L);  $A_1$  为初始总糖含量 (g/L);  $A_2$  为总糖含量 (g/L) 终浓度; x 表示发酵时间 (d);  $x_0$ 、dx 为方程系数。

通过 origin 8.6 软件对总糖含量和方程式 (7) 进行拟合, 得  $A_1=316.07$ ,  $A_2=30.81$ ,  $X_0=5.06$ ,  $dx=1.35$ 。带入式 (7) 得总糖消耗随发酵过程变化的动力学模型为:

$$Y=30.81+\frac{285.26}{1+\exp\left[\frac{(x-5.06)}{1.35}\right]} \quad (8)$$

糖消耗值与预测值模拟拟合 Boltzmann 曲线如图 7 所示。

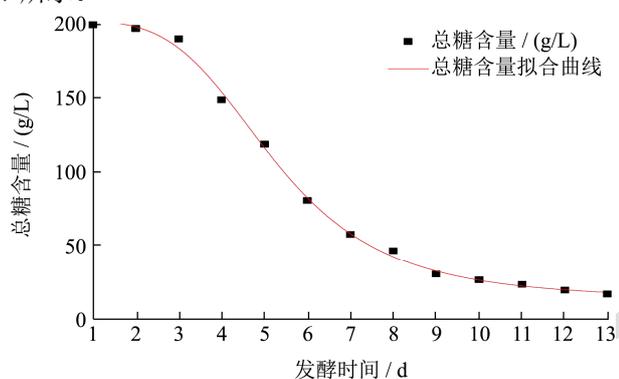


图 7 总糖消耗实验值与预测值模型拟合曲线

Fig.7 Fitness curve of test values of total sugar consume and prediction values

### 3 结论

3.1 对红茶菌芒果复合果酒选取总酚含量、DPPH 自由基清除率和羟基自由基清除率进行抗氧化性测定, 随着发酵时间的延长, 复合酒的总酚含量、DPPH 自由基清除率和羟基自由基清除率总体上均呈现先上升后下降的趋势, 三者的变化趋势基本一致, 在发酵第 8 d 均达到最高, 分别为 799.61 mg/mL、92.50% 和 86.30%。这样的变化趋势也与酵母菌的生长规律有一定的相关性, 随着发酵的进行, 酵母菌快速增长, 分解原料中的营养物质, 产生大量抗氧化性物质, 抗氧化性增强, 随着酵母细胞生长的稳定和衰亡及在发酵过程中氧气的进入等, 抗氧化性物质被分解或发生其他化学反应, 导致抗氧化性下降。

3.2 对红茶菌芒果复合果酒发酵过程中酵母菌生长量、总糖含量及酒精浓度进行了测定, 在整个发酵阶段, 酵母菌生长量、总糖含量及酒精浓度的变化趋势相互关联, 发酵第 3 d 到第 8 d, 酵母菌生长量大幅度

上升, 进入生长对数期, 此时, 酒精的生成量也以类似的变化趋势进行增长, 而总糖含量在这一时期大幅度下降。发酵结束后 (第 13 d) 复合果酒中酵母菌数量为  $8.11 \times 10^7$  个/mL, 酒精浓度为 11.10%, 总糖含量 17.00 g/L。

3.3 利用 Origin 8.6 软件对数据进行非线性拟合, 以 SGomperts 方程建立了红茶菌芒果复合果酒的酵母菌生长动力学模型, 以 Logistic 方程建立了酒精生成动力学模型, 以 Boltzmann 方程建立了总糖消耗的动力学模型, 三种模型的决定系数  $R^2$  分别为 0.9841、0.9926、0.9978。实验值与三种动力学模型的拟合曲线拟合程度很高, 说明三种动力学模型对红茶菌芒果复合果酒在发酵过程中菌体生长量、酒精生成量及总糖消耗的实际变化情况能进行很好的描述。通过红茶菌芒果复合果酒发酵动力学模型的建立, 将进一步掌握酵母菌、酒精生成及总糖消耗在果酒发酵过程中的生理生化及动力学特征, 也能反映出这三者之间的相互关联关系, 将为今后红茶菌芒果复合果酒的工业化生产提供一定的参考。

### 参考文献

- [1] 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 Qing-ping, JIN Xin, GUO Miao-miao, et al. Application of kombucha in vinegar production by grain raw materials fermentation [J]. China Brewing, 2019, 38(6): 90-95
- [2] 胡晓磊, 吴迅, 马永辉, 等. 红茶菌发酵马铃薯醋工艺研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(6): 196-200  
HU Xiao-lei, WU Xun, MA Yong-hui, et al. Fermentation process of potato vinegar by kombucha [J]. China Brewing, 2019, 38(6): 196-200
- [3] 唐思颖, 涂传海, 胡文秀, 等. 红茶菌发酵黄浆水的体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 1-6  
TANG Si-jie, TU Chuan-hai, HU Wen-xiu, et al. Antioxidant activity of fermented soy whey with kombucha consortium [J]. Food Science, 2019, 40(17): 1-6
- [4] 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  
CHAI Li-na, XU Wei, LYU Huan, et al. The technology of fermented *Heraclum dissectum* beverage of kombucha [J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 69-73
- [5] 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 Qing-peng, HU Zhuo-yan, ZHAO Lei, et al. Optimization of processing parameters for kombucha

- fermentation of Ion aril [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(1): 216-221
- [6] 孙永康,卢琴琴.红茶菌酒的研制[J].中国酿造,2015,34(1): 172-175  
SUN Yong-kang, LU Qin-qin. Development of Kombucha wine [J]. China Brewing, 2015, 34(1): 172-175
- [7] 李卓楠,陈永琼,杜成勋.攀枝花气候条件对芒果生长的影响[J].高原山地气象研究,2010,30(4):68-71  
LI Fu-qiang, CHEN Yong-qiong, DU Cheng-xun. Impact of the climatic condition to the growth of mango in Panzhihua [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(4): 68-71
- [8] 李国鹏,张林辉,解德宏,等.怒江干热河谷芒果种质资源主成分分析[J].贵州农业科学,2010,23(11):29-30  
LI Guo-peng, ZHANG Lin-hui, XIE De-hong, et al. Principal component analysis of mango germplasm resources in Nujiang dry-hot valley [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, 23(11): 29-30
- [9] 李昌宝,李丽,任二芳,等.果胶酶和纤维素酶对芒果出汁率及品质的影响[J].食品工业科技,2015,36(13):217-219, 224  
LI Chang-bao, LI Li, REN Er-fang, et al. Optimization of pectinase and cellulose treatment condition for improving the mango juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(13): 217-219, 224
- [10] 岑涛,岳田利,袁亚宏,等.云南芒果中酵母菌分离鉴定及在芒果酒发酵中的应用[J].食品科学,2015,36(11):119-124  
CEN Tao, YUE Tian-li, YUAN Ya-hong, et al. Isolation and identification of yeasts in mango from Yunnan and their application in mango wine fermentation [J]. Food Science, 2015, 36(11): 119-124
- [11] 王宇鸿,雷湘兰,梁青.番木瓜芒果复合发酵果醋工艺研究[J].中国酿造,2013,32(10):142-145  
WANG Yu-hong, LEI Xiang-lan, LIANG Qing. Fermentation process of compound vinegar of papaya and mango [J]. China Brewing, 2013, 32(10): 142-145.
- [12] 王天陆.芒果果酒酿造工艺研究[J].食品科技,2009,34(2): 56-58  
WANG Tian-lu. Study on fermentation technology of mango wine [J]. Food Science and Technology, 2009, 34(2): 56-58
- [13] 张宇.发酵动力学研究、开发与应用新进展[J].中国新技术新产品,2009,21(5):7-12  
ZHANG Yu. New progress of fermentation kinetics study, development and application [J]. China New Technologies and Products, 2009, 21(5): 7-12
- [14] SONG H, EOM M H, LEE S, et al. Modeling of batch experimental kinetics and application to fed-batch fermentation of *Clostridium tyrobutyricum* for enhanced butyric acid production [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 53(1): 71-76
- [15] GB/T15038-94 葡萄酒、果酒通用试验方法[S].北京:全国食品工业标准化技术委员会,1994  
GB/T15038-94 General Test Methods for Wine and Fruit Wine [S]. Beijing: National Food Industry Standardization Technical Committee, 1994
- [16] 顾燕平.紫外可见分光光度计在食品检测中的应用[J].轻工科技,2013, 6:94-95  
GU Yan-ping. Application of UV VIS spectrophotometer in food detection [J]. Light Industry Science and Technology, 2013, 6:94-95
- [17] Soumaya K, Ribai B A, Ines B, et al. Investigation of extracts from (Tunisian) *Cyperus rotundus* as antimutagens and radical scavengers [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2005, 20(3): 478-484
- [18] 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].延边:延边大学,2016  
YAN Sheng-nan. Study on the optimum technological conditions and antioxidant activity of *Actinidia arguta* fruit wine [D]. Yanbian: Yanbian University, 2016
- [19] 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  
SU Long, LYU Feng-dan, WANG Xue-ru, et al. Optimization of fermentation parameters by response surface methodology and the antioxidant capacity of *Myrica rubra* wine [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(20): 146-151
- [20] 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  
ZHAO Mou-ming, DONG Hong-zhu, LIN Lian-zhu. Comparative study on the phenolic profiles of eight fruits and their antioxidant activities [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(10): 225-236
- [21] 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  
LI Xue, BAI Xin-peng, CAO Jun, et al. Fermentation kinetics and antioxidant activity of cactus wine [J]. Food Science, 2017, 38(4): 87-92

(下转第 266 页)