

桑葚果酒分批发酵动力学研究

The batch fermentation kinetics of mulberry fruit wine

胡永正 李明元 李梅 丁文武

HU Yong-zheng LI Ming-yuan LI Mei DING Wen-wu

康玲 王冲 陈建桦 李春梅

KANG Ling WANG Chong CHEN Jian-hua LI Chun-mei

(西华大学食品与生物工程学院, 四川 成都 610039)

(School of Food and Bioengineering, XiHua University, Chengdu, Sichuan 610039, China)

摘要:以桑葚汁为原料,探讨果酒发酵过程中菌体生长、产物生成和底物消耗变化规律,利用 Logistic 模型方程拟合菌体生长、产物生成、基质消耗曲线,建立发酵动力学模型。结果表明,当发酵液初始含糖量为 200 g/L 时,接种 5% 活化酵母,28 ℃ 发酵 100 h 后,残糖含量降为 3.86 g/L,酵母数量增长为 2.83×10^8 CFU/mL,乙醇含量达到 9.01%,菌体生长、产物生成、基质消耗的动力学模型拟合度良好,模型 R^2 分别为 0.974, 0.988, 0.991, 模型能较好地反映和预测桑葚果酒发酵变化的过程。

关键词:桑葚;果酒;发酵;动力学

Abstract: The laws of cell growth, product formation and substrate consumption during mulberry wine fermentation were studied with mulberry juice. The kinetic models were established through Logistic model equation to fit the curves of cell growth, product formation and substrate consumption. The results showed as follows: When the initial sugar concentration was 200 g/L, the inoculation of activated yeast was 5%, and the fermentation time lasted for 100 h at 28 ℃, the residual sugar concentration of fermentation broth decreased to 3.86 g/L, the number of yeast increased to 2.83×10^8 CFU/mL and the ethanol concentration reached 9.01%. The models fitted well for cell growth, product formation and substrate consumption. The R^2 of models was 0.974, 0.988 and 0.991 respectively. Meanwhile, the models could reflect and predict the fermentation process of mulberry wine well.

Keywords: mulberry; fruit wine; fermentation; kinetics

桑葚是多年生桑科落叶乔木桑(*Morus alba* L.)的成熟果实,桑葚富含糖分、有机酸、游离氨基酸、维生素、花青素、矿物质及微量元素^[1],具有较强的抗氧化活性^[2],已被国家卫生计生委列入“既是食品又是药品的物品名单”^[3],由于其营养丰富且具有一定保健功能,已成为研究热点。目前桑葚已被开发成不同产品,如桑葚汁饮料、桑葚果醋^[4]、桑葚酒等^[5]。而在桑葚酒的研究中,主要集中于酵母筛选^[6]、酿造工艺、物质变化^[7]和品质研究^[8]等方面,鲜见桑葚果酒酿造动力学模型的相关研究。

发酵过程中环境因素对菌体生长速率、基质消耗速率和产物生成速率有极大影响,发酵动力学则是通过菌体生长、基质消耗、产物生成的动态平衡探究其内在规律^[9],通过发酵动力学,可以达到对最佳发酵工艺条件的控制,预先估判早期出现的异常情况,同时为分批发酵过渡到连续发酵、发酵放大提供理论依据^[10]。

关于模拟发酵过程的模型有多种,GÜLNUR B 等^[11]总结了发酵动力学中常用的符合菌体生长变化、产物生成变化、底物消耗变化的 10 余种发酵动力学模型方程,包括 Monod 方程、Moser 方程、Teissier 方程等;郑启富等^[12]提出一种基于径向基函数网络和最小片而成回归技术的发酵动力学建模方法。另外,Logistic 方程是典型“S”型曲线,被广泛地作为发酵过程中酵母的生长变化模型^[13],本试验拟针对桑葚酒酿造过程,通过探究菌体生长数、残糖消耗量、乙醇生成量的变化情况研究桑葚果酒酿造过程中的发酵动力学,建立数学模型并求解相关参数,为桑葚酒酿造过程中的跟踪控制和放大生产提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

桑葚:大十桑葚,购于四川南部县;

基金项目:四川省科技支撑项目(编号:2015NZ0007)

作者简介:胡永正,男,西华大学在读硕士研究生。

通信作者:李明元(1965—),男,西华大学教授,硕士。

E-mail: limingyuan519@qq.com

收稿日期:2016—10—12

酵母:安琪果酒酵母 SY,安琪酵母股份有限公司;
正丁醇:色谱纯,美国 sigma 公司;
葡萄糖、3-5 二硝基水杨酸:分析纯,成都市科隆化工试剂厂;
气相色谱仪:GC2020 型,上海析默分析仪器有限公司;
紫外可见分光光度计:UV-2600 型,美国 UNICO 公司;
血球板计数器:25×16 型,上海市求精生化试剂仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 工艺流程

桑葚→榨汁→过滤→添加蔗糖→添加二氧化硫→添加活化后酿酒酵母→恒温发酵→陈酿→澄清→调酒→成品

1.2.2 研究方法 在陈祖满^[14]和 Wang C Y 等^[15]对桑葚酒工艺研究的基础上,对桑葚酿造工艺进行预试验后确定最佳工艺,量取 250 mL 桑葚汁灭菌并调整成分,将活化的酵母按照 5%的添加量加入到桑葚汁中,于 28 ℃下恒温培养 100 h,每隔 4 h 取样,测定 26 次取样的样品中酵母数量、残糖含量及乙醇体积分数。

1.2.3 检测方法

(1) 酵母数量:采用血球板计数法。将发酵液稀释一定倍数后用 0.1%吕氏碱性美兰染液染色,然后滴于 25×16 的血球板计数器上,利用 16×40 倍显微镜进行酵母计数。

(2) 残糖含量:3-5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid,DNS)比色法。根据王春晓^[16]的方法进行简化改进:准确称量干燥至恒重的葡萄糖 100 mg 定容至 100 mL,作为 1.0 mg/mL 的标注贮备液;取 3,5-二硝基水杨酸 6.3 g 及 2 mol/L 氢氧化钠溶液 262 mL 加到 364 g/L 的酒石酸钾钠溶液中,再各加 5 g 结晶酚和 5 g 亚硫酸氢钠溶解,定容至 1 000 mL 后贮藏于棕色瓶;标准曲线制作步骤见表 1。测定样品时,吸取 1.0 mL 样品溶液,加入 1.0 mL 蒸馏水和 1.5 mL DNS 溶液,混合均匀后沸水中加热 5 min 后冷却,再加入 21.5 mL 蒸馏水,摇匀后在 540 nm 处测定吸光值,根据标准曲线查询样品葡萄糖含量。

表 1 葡萄糖标准曲线操作步骤[†]

Table 1 Steps to create a standard curve of glucose

管号	葡萄糖贮备液/mL	蒸馏水/mL	DNS 溶液/mL	葡萄糖含量/mg
0	0.0	2.0	1.5	0.0
1	0.2	1.8	1.5	0.2
2	0.4	1.6	1.5	0.4
3	0.6	1.4	1.5	0.6
4	0.8	1.2	1.5	0.8
5	1.0	1.0	1.5	1.0

[†] 将各管溶液混合均匀,在沸水中加热 5 min,取出后立即用冷水冷却到室温,再向每管加入 21.5 mL 蒸馏水,摇匀后,在 540 nm 处测定吸光值。

样品中糖含量计算:

$$S = \frac{mn}{v},$$
 (1)

式中:

S——样品糖含量;g/L;
m——根据吸光值查找标曲所得糖含量,mg;
v——吸取样品液的体积,mL;
n——稀释倍数。

(3) 乙醇体积分数:气相色谱法。参照 GB/T 15038—2006 进行改进:以正丁醇作为内标物质,标准样品和待测样品按体积分数 2%添加正丁醇作内标。色谱条件:色谱柱:WOD-WAX(30 m×0.25 mm,0.25 μm);升温程序:40 ℃保持 3 min,以 10 ℃/min 上升至 180 ℃,保持 1 min,检测器温度 250 ℃,18 min;进样器 210 ℃,平衡时间 3 min;氢气流量:35 mL/min,空气流量:387 mL/min。

1.3 动力学发酵模型

1.3.1 菌体生长动力学模型 前人利用 Logistic 方程分别对蜂蜜酿酒^[17]、甘蔗酿酒^[18]进行动力学研究,均得出较好的拟合效果,根据本试验数据统计结果可以看出,菌体数量呈“S”型,因此可将 Logistic 模型应用于桑葚果酒酿造过程进行拟合。Logistic 方程为:

$$\frac{dx}{dt} = \mu_{m1} \left(1 - \frac{x}{x_m}\right) x.$$
 (2)

将该方程左右两边同时积分得:

$$x_t = \frac{x_m x_0 e^{\mu_{m1} t}}{x_m - x_0 + x_0 e^{\mu_{m1} t}},$$
 (3)

式中:

μ_{m1}——最大比生长速率,h⁻¹;
x_m——最大菌体数量,×10⁸ CFU/mL;
x₀——初始菌体数,×10⁸ CFU/mL;
x_t——发酵 t 时间后菌体数量,×10⁸ CFU/mL;
t——发酵时间,h。

1.3.2 产物生成模型 在桑葚果酒发酵初期,由于酵母细胞处于适应阶段,乙醇生成量少,当菌体进入对数生长期后,伴随着菌体大量繁殖,乙醇代谢逐渐旺盛,稳定期的酵母乙醇产量也高,当代谢进入后期,乙醇浓度增加,酵母细胞代谢受抑制,同时糖含量的减少,导致乙醇生成含量减少并趋于稳定,乙醇生成模型同样为“S”曲线,综合考虑,本试验乙醇生成模型仍使用 Logistic 方程进行模拟预测。Logistic 方程:

$$\frac{dp}{dt} = \mu_{m2} \left(1 - \frac{p}{p_m}\right) p.$$
 (4)

将该方程两边同时积分后:

$$p_t = \frac{p_m p_0 e^{\mu_{m2} t}}{p_m - p_0 + p_0 e^{\mu_{m2} t}},$$
 (5)

式中:

μ_{m2}——最大乙醇生成速率,h⁻¹;
p_m——最大乙醇体积分数,%;
p₀——初始乙醇体积分数,%;
p_t——发酵 t 时间后乙醇体积分数,%;
t——发酵时间,h。

1.3.3 底物消耗模型 桑葚果酒酿造过程中,底物中糖主要

作用包括:① 作为酵母生长所需碳源,作为结构物质用于合成酵母自身物质;② 被酵母氧化产生能量;③ 生成乙醇;④ 产生改善酒体口感风味物质成分^[19]。因此,在菌体生长、产物生成两个模型基础上,结合发酵过程中碳平衡计算,可得糖的消耗公式:

$$-\frac{ds}{dt} = \frac{1}{y_{x/s}} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{y_{p/s}} \frac{dp}{dt} + m_s x \quad (6)$$

两边积分后得:

$$\frac{x_m - x_0 + x_0 e^{\mu_{m1} t}}{x_m}, \quad (7)$$

式中:

- $s_{(0)}$ —— 初始糖含量, g/L;
- $s_{(t)}$ —— 发酵 t 时间后糖含量, g/L;
- $x_{(t)}$ —— 测定时刻菌体数量, g/L;
- $x_{(0)}$ —— 初始菌体数量, $\times 10^8$ CFU/mL;
- $y_{x/s}$ —— 菌体得率系数, $\times 10^8$ CFU/g;
- $p_{(t)}$ —— 测定时刻乙醇体积分数, %;
- $y_{p/s}$ —— 产物得率系数, mL/g;
- m_s —— 细胞碳源维持系数, h^{-1} ;
- μ_{m1} —— 菌体最大比生长速率, h^{-1} ;
- x_m —— 最大菌体数量, $\times 10^8$ CFU/mL;
- t —— 发酵时间, h。

2 结果与分析

2.1 标准曲线

根据体积分数为 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% 的标准溶液, 以正丁醇作内标, 以乙醇峰面积与正丁醇峰面积的比值为纵坐标、乙醇体积分数为横坐标作图, 见图 1(a), 得出标准曲线: $y=0.372\ 6x-0.000\ 8$; 根据表 1 操作, 得出葡萄糖标准曲线见图 1(b), 回归曲线为: $y=0.552\ 7x-0.012\ 2$ 。

2.2 桑葚酒发酵过程中细胞数量、基质及产物的变化

按照 1.2.2 所示的发酵条件对桑葚酒进行发酵, 并对发酵过程中的酵母数量、还原糖及乙醇体积分数进行测定, 结果见图 2。由图 2 可知, 在 0~8 h, 糖含量由 200.00 g/L 减少为 196.70 g/L, 乙醇体积分数增加至 0.2%, 由于初始糖含量浓度较高, 对酵母具有抑制作用, 同时酵母处于适应期, 此时乙醇生成量、糖消耗量几乎无变化; 8~24 h 为酵母对数生长期, 酵母数量由 0.45×10^8 CFU/mL 迅速增加至 2.55×10^8 CFU/mL, 糖含量由 196.70 g/L 降解为 134.64 g/L, 乙醇体积分数由 0.22% 增加为 3.07%, 酵母利用碳源合成自身物质的同时, 部分用于代谢生成乙醇, 糖消耗急剧增加, 乙醇的生成随着酵母的生长而增加; 酵母生长进入稳定期后, 其数量保持在 2.83×10^8 CFU/mL 左右, 发酵至 100 h 时, 糖含量降为 3.86 g/L, 酒精含量为 9.01%, 此时酵母生长与死亡保持动态平衡。整个发酵过程糖醇转化率为 46%, 结合式(7)及其参数分析可知, 理论上每 1 L 发酵液中 108.41 g 糖用于合成乙醇, 23.92 g 糖用于酵母生长, 67.67 g 糖用于产生能量和风味物质。

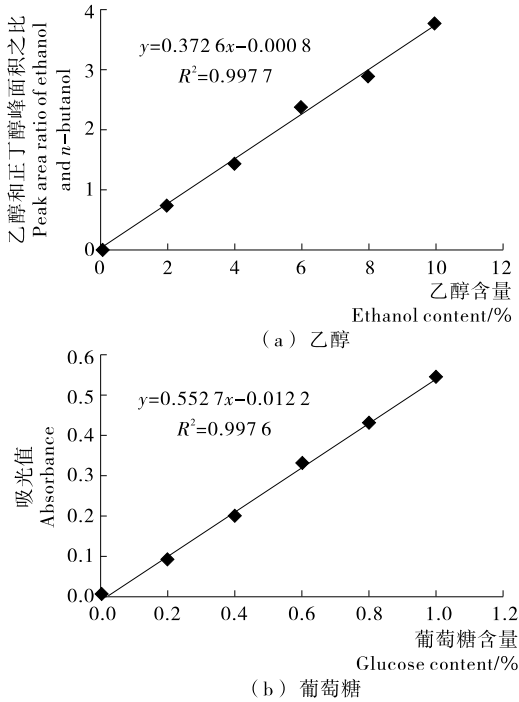


图 1 乙醇体积分数标准曲线和葡萄糖标准曲线
Figure 1 Standard curve of alcohol content and glucose content

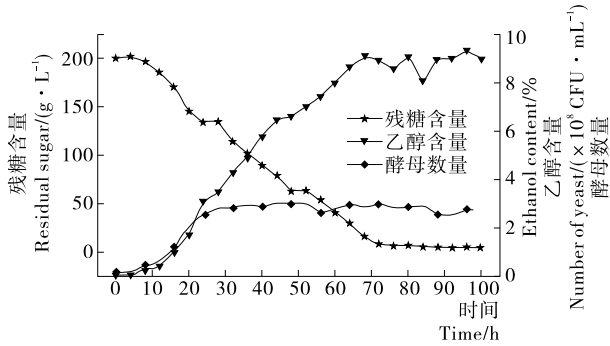


图 2 桑葚果酒发酵过程中主要指标变化
Figure 2 The metabolic curves of fermentation process of Mulberry wine

由图 3 可知, 酵母生长速率在 16 h 左右达到最大, 乙醇生成速率在 48 h 左右达到最大, 乙醇最大生成速率出现晚于酵母最大生长速率, 表明乙醇生成与细胞生长是部分偶联型; 糖消耗速率出现两个最高峰, 分别是酵母生长率最大时和乙醇产率最大时, 表明基质的消耗过程主要用于酵母生长繁殖和代谢生成乙醇; 在 75 h 以后, 残糖含量降低至 5.4 g/L, 乙醇体积分数为 8.5%, 酵母细胞 2.84×10^8 CFU/mL, 基质消耗速率趋于平稳但不为零, 表明此时糖的消耗主要不是用于乙醇生成, 结合实际分析, 有可能为维持酵母细胞代谢和生成芳香类物质。

2.3 模型参数求解

2.3.1 菌体生长动力学模型求解 根据试验数据, 利用 origin 9.0 软件对数据进行分析并拟合, 其结果见图 4; 参数预测结果为 $x_{(0)} = 0.030 \times 10^8$ CFU/mL, $x_m = 2.836 \times 10^8$ CFU/mL, $\mu_{m1} = 0.274\ \text{h}^{-1}$, 由非线性回归和方差分析可

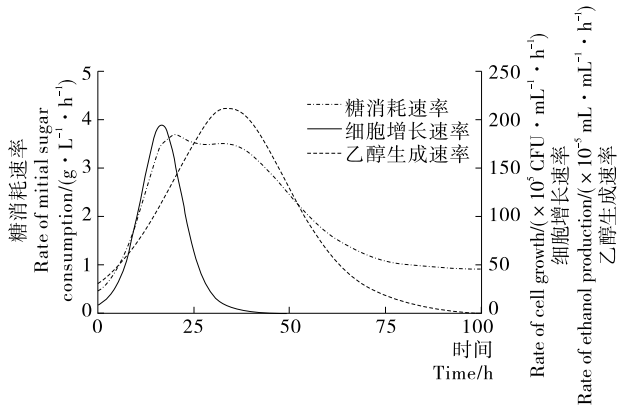


图3 桑葚果酒发酵过程中物质变化速率
Figure 3 Changes in the rate of alcohol production, cell growth and initial sugar consumption

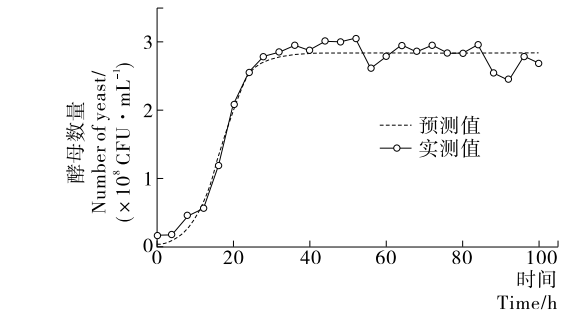


图4 菌体生长真实值与预测值模型拟合曲线
Figure 4 Fitting curve of actual values and predictive values for cell growth

知, $R^2=0.974$, 说明该模型能较好地模拟并预测酵母菌体生长的动态变化过程, 将拟合值代入式(3)得模型方程:

$$x_t = \frac{0.085e^{0.274t}}{2.806 + 0.03e^{0.274t}} \quad (8)$$

由图4可知, 拟合曲线初期与真实值差距较大, 在对数生长期具有较高的拟合度。在0~4 h, 酵母处于适应期, 同时由于底物浓度的抑制作用, 生长缓慢; 在8~24 h, 酵母处于对数生长期, 此时发酵过程主要以酵母生长为主, 伴有少量乙醇生成; 当酵母进入稳定期, 发酵罐中活菌数量保持动态平衡, 此时发酵罐内主要进行产物生成过程, 此时酵母细胞的抑制以产物抑制为主。

2.3.2 产物生成动力学模型求解 根据测定样品中乙醇与正丁醇的比值, 得出不同发酵时间的发酵液中乙醇体积分数, 并利用origin 9.0 软件对其进行非线性拟合, 结果见图5。拟合结果显示, $p_m = 8.941\%$, $p_0 = 0.329\%$, $\mu_{m2} = 0.095 \text{ h}^{-1}$, 方差分析 $R^2=0.988$, 该方程能较好的拟合酵母乙醇生成曲线。将所求参数代入式(5), 得:

$$p_t = \frac{2.942e^{0.095t}}{8.612 + 0.329e^{0.095t}} \quad (9)$$

由图5可知, 在发酵中期和后期产物的真实值与预测值均有较好的拟合度, 乙醇生成动力学模型能较好地反应发酵过程中乙醇的变化情况。

2.3.3 基质消耗动力学模型求解 将式(8)、(9)式方程(7), 并利用origin软件对试验结果进行非线性回归及方差分析

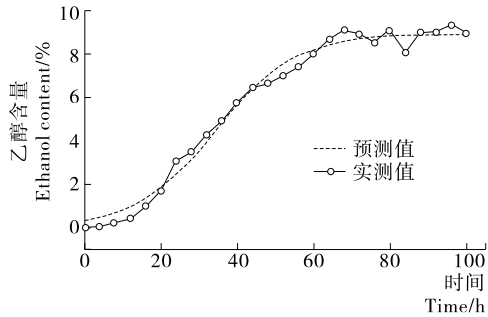


图5 产物生成真实值与预测值模型拟合曲线
Figure 5 Fitting curve of actual values and predictive values for alcohol production

得, $\frac{1}{y_{x/s}} = 8.959 \times 10^{-8} \text{ g/CFU}$, $\frac{1}{y_{p/s}} = 12.032 \text{ g/mL}$, $m_s = 0.313 \text{ h}^{-1}$, 方差分析 $R^2=0.991$, 可知方程具有较好的拟合度, $y_{x/s} = 0.11 \times 10^8 \text{ CFU/mL}$, $y_{p/s} = 0.08 \text{ mL/g}$, 与实际相符合, 能比较真实地反应基质消耗的过程。将参数代入式(7), 得拟合方程:

$$s_{(t)} = 200.724 - \frac{0.762e^{0.274t}}{2.806 + 0.03e^{0.274t}} - \frac{35.399e^{0.095t}}{9.612 + 0.329e^{0.095t}} - 3.240 \ln \frac{2.806 + 0.03e^{0.274t}}{2.836} \quad (10)$$

拟合曲线见图6。由图6可知, 在12~64 h时, 糖含量真实值与预测值较吻合。在发酵前期和后期, 真实值与预测值有一定偏差, 可能是发酵前期测量误差导致的糖含量略微偏高, 后期由于底物含量呈降低趋势但不明显, 故导致方程拟合时误差较大, 总体上该动力学模型能较好的反映桑葚酒发酵过程中基质消耗的过程。

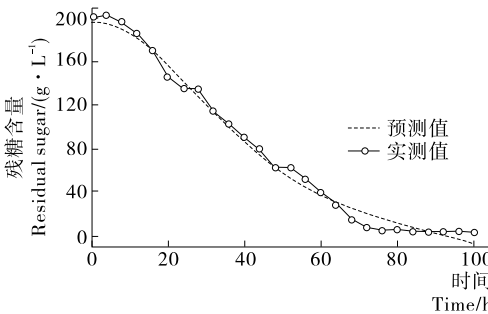


图6 底物消耗真实值与预测值模型拟合曲线
Figure 6 Fitting curve of actual values and predictive values for substrate consumption

2.3.4 模型验证 为验证模型可靠性, 取250 mL 桑葚汁调整初始含糖量为200 g/L, 接种5%活化酵母后28℃恒温发酵100 h, 每隔4 h取样测定其糖含量、乙醇体积分数、细胞含量, 将模型预测值与实际值作对比, 结果见表2。由表2可知, 酵母数量模型预测值与实测值相对偏差仅为5.90%, 乙醇体积分数相对偏差为7.05%, 残糖含量相对偏差为3.38%, 说明模型方程能较好地反应发酵过程中酵母数量、乙醇体积分数和残糖含量的变化过程, 该模型参数对指导桑葚果酒发酵具有实际意义。

表 2 模型预测值与实际值数据对比
Table 2 Comparison of predictive values and actual values

发酵时 间/h	酵母数量/($\times 10^8$ CFU $\cdot$ mL $^{-1}$)		乙醇体积分数/%		残糖含量/(g $\cdot$ L $^{-1}$)	
	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值
0	0.16	0.03	0.00	0.33	200.49	196.26
4	0.17	0.08	0.27	0.47	202.08	193.94
8	0.45	0.24	0.42	0.68	196.70	189.89
12	0.56	0.62	0.70	0.96	185.44	182.58
16	1.19	1.30	0.99	1.33	170.67	170.81
20	2.08	2.03	1.71	1.82	145.55	156.26
24	2.55	2.50	3.07	2.43	134.64	141.82
28	2.78	2.71	3.49	3.16	134.64	127.91
32	2.85	2.79	4.29	3.97	114.18	113.99
36	2.95	2.82	4.92	4.82	102.15	100.05
40	2.87	2.83	5.78	5.64	90.31	86.53
44	3.01	2.83	6.45	6.39	79.68	73.99
48	3.00	2.83	6.73	7.02	63.21	62.80
52	3.05	2.83	7.01	7.53	63.03	53.09
56	2.60	2.83	7.84	7.93	53.34	44.78
60	2.78	2.83	8.00	8.22	40.60	37.68
64	2.94	2.83	8.66	8.44	29.54	31.55
68	2.85	2.83	9.10	8.59	15.66	26.16
72	2.95	2.83	8.93	8.70	7.93	21.31
76	2.83	2.83	8.57	8.77	5.42	16.85
80	2.83	2.83	9.11	8.83	6.46	12.67
84	2.95	2.83	8.10	8.86	4.96	8.68
88	2.54	2.83	8.99	8.89	4.36	4.84
92	2.43	2.83	9.01	8.90	4.01	1.08
96	2.78	2.83	9.33	8.92	4.63	-2.61
100	2.68	2.83	9.01	8.92	3.86	-6.25
平均相对 偏差/%	5.90		7.05		3.38	

3 结论

桑葚果酒酿造试验中,在初始糖含量为 200 g/L 条件下,接种 5%活化酵母置于 28 ℃恒温培养,发酵 100 h 后乙醇含量为 9.01%,残糖含量 3.86 g/L,酵母数量 2.83×10^8 CFU/mL。发酵 8 h 时酵母进入对数生长期,24 h 后进入稳定生长期,随着酵母生长乙醇产生,发酵至 72 h 后糖含量减少缓慢,乙醇体积分数保持稳定,主发酵基本结束。应用 Logistic 模型方程,建立桑葚果酒酿造过程中菌体生长、底物消耗、产物生成的动力学模型,通过 origin 9.0 软件对方程进行非线性回归及方差分析,得出模型预测值与实际值数据拟合 R^2 分别为 0.974,0.988,0.991,具有较高的拟合度,表明试验所求动力学能较好地反应桑葚果酒发酵过程中菌体数量、底物消耗、产物生成的动态变化过程。

发酵动力学对工业化生产控制提供依据,本试验探究的是桑葚汁含量较少情况下果酒酿造过程,其温度、溶氧等条件易于控制,当发酵进入工业化生产,由于发酵体积增大,机

械搅拌、温度控制、泡沫等条件的共同作用,对酵母生长和代谢具有极大影响,发酵动力学相关参数的确定会有所不同^[18],因此,要建立适合于工业化控制的发酵动力学过程,需在工业化生产过程中进行相关研究,建立特定发酵条件的发酵动力学模型。

参考文献

[1] 孙波,李勇,周红英. 桑葚酿酒研究进展[J]. 北方蚕业, 2011, 32(1): 1-4.
[2] MERVE T, GAMZE T, DILEK B, et al. The effects of juice processing on black mulberry antioxidants[J]. Food Chemistry, 2015, 186(1): 277-284.
[3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 卫生部关于进一步规范保健食品原料管理的通知[EB/OL]. (2002-02-18) [2016-06-12]. <http://www.nhfp.gov.cn/sps/s3593/200810/a298f342c464475b923bcd3c9d0575a.shtml>.

(下转第 44 页)

3 结论

研究表明,马铃薯全粉的理化性质随挤压膨化参数的变化会发生显著变化,挤压膨化处理能够改善马铃薯全粉的一些理化性质,可通过相应的挤压膨化处理得到具有相应理化性质的全粉,应用于马铃薯产品的加工中。挤压膨化过程中,物料含水量的增大能够降低马铃薯全粉的水溶性、碘蓝值,提高其吸水性、吸油性,而挤压温度和螺杆转速的作用相反。随物料含水量、挤压温度、螺杆转速的增大,膨胀性先增大后减小,说明加工过程中应控制适宜的挤压条件以得到膨胀性较好的马铃薯产品。

适当的物料含水量、螺杆转速能够降低全粉的糊化温度;物料含水量、挤压温度、螺杆转速的增大能够提高全粉的糊化黏度;物料含水量为 30%时,全粉的热稳定性较好,挤压温度的增大能够提高全粉的热稳定性;物料含水量、螺杆转速的增大能够提高全粉的凝胶性,而挤压温度的作用相反。

参考文献

[1] 宋国安. 马铃薯全粉及其系列产品开发前景广阔[J]. 山东食品科技, 1999(6): 19-20.

[2] 庞芳兰. 发达国家马铃薯产业的发展及启示[J]. 世界农业, 2008(3): 53-55.

[3] 吕世安. 中国马铃薯产业发展现状与趋势[J]. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2002, 20(4): 29-34.

[4] 刘红武. 食品挤压技术[J]. 食品科学, 2000, 21(12): 184-187.

[5] 杜冰, 梁淑如, 程燕锋, 等. 挤压膨化加工过程参数及其影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(5): 133-136.

[6] CHINNASWAMY R, HANA M A. Relationship between amylase content and expansion properties of corn starches [J]. Cereal Chemistry, 1988, 65(2): 138-143.

[7] DISSING U, MATTIASSON B. Polyelectrolyte complexes as vehicles for affinity precipitation of proteins[J]. Journal of Bio-

technology, 1996, 52(1): 1-10.

[8] 解铁民, 高扬, 张英蕾, 等. 挤压参数对薏米挤出产品物理特性的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 18-22, 101.

[9] 吴卫国, 谭兴和, 熊兴耀, 等. 不同工艺和马铃薯品种对马铃薯颗粒全粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(6): 98-102.

[10] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338.

[11] 冯凤琴, 刘东红, 叶立扬. 甘薯全粉加工及其挤压膨化食品特性的分析研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 99-102.

[12] 赵学伟, 魏益民, 张波. 挤压对小米蛋白溶解性和分子量的影响[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(2): 38-42.

[13] 杜双奎. 玉米品种籽粒品质与挤压膨化特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006: 18-24.

[14] 李向阳, 刘传富, 刁恩杰, 等. 双螺杆挤压对膨化小米糊化特性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 44-46.

[15] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 22-27.

[16] NOOSUK P, HILL S E, PRADIPASENA P, et al. Structure-viscosity relationships for that rice starches[J]. Starch, 2003, 55(8): 337-344.

[17] 黄诚, 周长春, 尹红, 等. 玉米产品挤压膨化特性的影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(4): 91-93.

[18] 朱永义, 赵仁勇, 林利忠. 挤压膨化对糙米理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2003, 18(2): 14-16.

[19] OKE M O, AWONORIN S O, WORKNEH T S. Expansion ratio of extruded water yam starches using a single screw extruder[J]. African Journal of Agricultural Research, 2013, 8(9): 750-762.

[20] 凌彬. 营养膨化米果的开发研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012: 33-39.

[21] 朱永义, 赵仁勇, 林利忠. 挤压膨化对糙米理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2003, 18(2): 45-47.

[22] 吴广森. 紫糯全麦粉的挤压膨化处理及其应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015: 22-24.

(上接第 11 页)

[4] 彭晓虹, 杨普香, 黎小萍. 桑果汁饮料工艺技术的研究[J]. 食品科技, 2003(11): 64-73.

[5] 徐辉艳, 濮智颖, 王汉屏, 等. 桑葚果醋发酵工艺条件的研究[J]. 食品工业科技, 2009(2): 164-165.

[6] 赵祥杰, 杨荣玲, 肖更生, 等. 桑葚果酒专用酵母的筛选及鉴定[J]. 中国食品学报, 2008, 8(1): 60-65.

[7] 赖剑峰. 桑葚酒发酵过程中花青素的生物转化研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 9-15.

[8] 陈娟, 阚建全, 张荣, 等. 蜂蜜桑葚酒主要成分的分析[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(2): 113-119.

[9] 姚汝华. 微生物工程工艺原理[M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 129-156.

[10] HYOHAK S, MOON-HO E, SIRA L, 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.

[11] GÜLNUR B, PEMRA D, BETÜL K, et al. Mathematical description of ethanol fermentation by immobilized saccharo-myc

erevisiae[J]. Process Biochemistry, 1998, 33(7): 763-771.

[12] 郑启富, 朱益民, 杨锡宝. 发酵动力学建模的新方法[J]. 安徽化工, 2002(6): 49-50.

[13] IKASARI L, MITCHELL D. Two-phase model of the kinetics of growth of rhizopusoligosporus in membrane culture[J]. Biotechnol. Bioeng, 2000(68): 619-627.

[14] 陈祖满. 桑葚果酒酿造技术[J]. 中国酿造, 2005(4): 62-64.

[15] WANG Chu-yan, LIU Yan-wei, JIA Jun-qiang, et al. Optimization of fermentation process for preparation of mulberry fruit wine by response surface methodology[J]. African Journal of Microbiology Research, 2013, 7(3): 227-236.

[16] 王春晓, 江璐, 刘延琳. DNS 法监控葡萄酒发酵进程的应用研究[J]. 中国酿造, 2012, 31(9): 24-27.

[17] 张勇, 李从发, 艾遥琴, 等. 蜂蜜酒发酵动力学研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 136-139.

[18] 李秀萍, 吴幼茹, 王在谦. 甘蔗果酒发酵动力学研究[J]. 酿酒科技, 2015(5): 42-45.

[19] 徐抗震, 宋纪蓉, 伍星, 等. 发酵生产苹果酒的放大和动力学研究[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 27-31.