



赵庭,姜琳,贾晶,等. 小麦啤酒上面啤酒酵母生成 4-乙炔基愈创木酚的条件优化及其发酵动力学模型构建[J]. 轻工学报,2022,37(2):15-22.
ZHAO T,JIANG L,JIA J,et al. Optimization of 4-vinylguaiacol production by *Saccharomyces cerevisiae* and fermentation kinetic model of wheat beer brewing[J]. Journal of Light Industry,2022,37(2):15-22.
DOI:10.12187/2022.02.002

小麦啤酒上面啤酒酵母生成 4-乙炔基愈创木酚的条件优化及其发酵动力学模型构建

赵庭,姜琳,贾晶,付为,俞志敏

大连工业大学 生物工程学院,辽宁 大连 116034

摘要: 4-乙炔基愈创木酚(4-VG)是小麦啤酒中的重要风味物质。为促进 4-VG 的合成,以大麦芽和小麦芽为原料,上面啤酒酵母 WA-04 为发酵菌种,采用单因素试验结合响应面法优化小麦啤酒的酿造工艺,并通过研究发酵过程中 4-VG 的动态变化构建发酵动力学模型。结果表明:小麦啤酒酿造的最佳工艺条件为小麦芽添加量 45.9%,酵母接种量 1.4×10^7 CFU/mL,发酵温度 20.1℃,在此条件下,小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度最高,达到 2.30 mg/L;由构建的上面啤酒酵母 WA-04 生长动力学模型和 4-VG 生成动力学模型可知,该啤酒酵母生成 4-VG 的发酵动力学模型属于 I 型偶联关系。

关键词: 小麦啤酒;上面啤酒酵母;4-乙炔基愈创木酚;发酵动力学模型

中图分类号: TS261.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2022)02-0015-08

0 引言

小麦啤酒是指以小麦芽(占麦芽总质量 40%以上)、大麦芽和水为主要原料,添加酒花后,经上面啤酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)发酵酿造而成的啤酒^[1-2],具有洁白细腻的泡沫、浓郁的香味、强烈的杀口力、适中的苦味、略酸的口感,备受广大消费者青睐^[3]。小麦啤酒中富含酸类、脂类、酚类、高级醇类、醛类等风味物质^[4-5],其中,4-乙炔基愈创木酚(4-VG)能够赋予小麦啤酒特有的丁香味和草药香^[6-9],是小麦啤酒中不可或缺的风味物质,也是影响小麦啤酒成品香气形成的关键组分^[10]。

阿魏酸主要存在于大麦芽和小麦芽的外层,特

别是在富含阿拉伯木聚糖的糊粉层,其含量最为丰富。在小麦啤酒酿造过程中,麦芽中的阿魏酸从阿拉伯木聚糖聚合物中释放出来^[11],酚类异味(POF⁺)上面啤酒酵母菌株利用苯丙烯酸活性脱羧酶(PAD1)将其脱羧生成 4-VG^[12]。小麦啤酒中 4-VG 的含量受酵母菌种、原料组成、糖化工艺和发酵工艺的影响^[13]。崔云前^[14]研究发现,当醪化液的温度为 37℃时,有利于肉桂酰酯酶溶出,进而促进阿魏酸释放,使 4-VG 的合成量达到最大值;小麦啤酒中 4-VG 的最佳质量浓度为 2.0~3.0 mg/L,这既能突出小麦啤酒中特有的丁香味,也不至于使香味太过浓郁。张崇真^[10]研究发现,当在原料中添加 10%的浅色焦香麦芽时,肉桂酰酯酶的活性最高,

收稿日期:2021-07-21;修回日期:2022-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(31671796)

作者简介:赵庭(1996—),女,山东省烟台市人,大连工业大学硕士研究生,主要研究方向为啤酒酿造酵母及其代谢特性。
E-mail:zt150307@163.com

通信作者:俞志敏(1982—),男,辽宁省丹东市人,大连工业大学副教授,博士,主要研究方向为啤酒风味物质及其代谢调控。
E-mail:yuzhimin2005@163.com

4-VG 的含量最大。吴幼茹等^[15]研究发现,适当添加浅色焦香麦芽可以增加小麦啤酒的整体香味和品质,但用量过多会掩盖小麦啤酒的清凉感。成冬冬^[9]研究发现,添加芫荽籽和陈皮后,比利时小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度可达 3.512 mg/L,德国小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度可达 3.690 mg/L。

近年来,小麦啤酒日益受到消费者喜爱,为了酿造口感更好的小麦啤酒,势必要不断优化其酿造工艺。上面啤酒酵母 WA-04 (*Saccharomyces cerevisiae* WA-04) 是一种优良的小麦啤酒酿造酵母,与其他上面啤酒酵母相比,其发酵速度较快,酿造的小麦啤酒醇酯比适中,风味更好,丁香香气更为突出^[4]。基于此,本文拟以大麦芽和小麦芽为原料,选用上面啤酒酵母 WA-04 为发酵菌种,采用单因素试验研究小麦芽添加量、酵母接种量、发酵温度对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响,结合响应面法优化酿造工艺条件;构建上面啤酒酵母合成 4-VG 的发酵动力学模型,研究上面啤酒酵母合成 4-VG 过程中菌体与产物之间的动态定量关系,以期更有效地控制小麦啤酒的发酵过程,为适当增强小麦啤酒中的丁香风味提供基础研究数据,为小麦啤酒的工业化酿造提供一定的技术支持和理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦芽,烟台帝伯仕啤酒技术有限公司产;大麦芽,中粮麦芽(大连)有限公司产;上面啤酒酵母 WA-04,保存于大连工业大学菌种保藏中心;4-VG,色谱纯,购于 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 主要仪器与设备

ZXSD-1270 型恒温生化培养箱、ZWYR-D2403 型恒温培养振荡器,上海智诚分析仪器制造有限公司产;CR21 G 型超速冷冻离心机,通用医疗集团有限公司产;Agilent 1260 型高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司产;FC104 型电子天平,上海精科天平有限公司产;BGT-12A 型全自动糖化仪,香港赛维斯科科技有限公司产;IX73 型倒置显微镜,奥林巴斯(深圳)工业有限公司产。

1.3 实验方法

1.3.1 麦汁的制备

称取 100 g 麦芽粉(m (小麦

芽): m (大麦芽)=9:11)加入糖化杯,再加入 400 mL 去离子水后,将糖化杯放入糖化仪进行糖化,于 45 ℃ 保温 30 min,以 1 ℃/min 升温至 63 ℃ 并保温 1 h,以 1 ℃/min 升温至 72 ℃ 并保温 10 min,以 1 ℃/min 升温至 78 ℃ 并保温 10 min,糖化结束。过滤麦汁,并用 80 ℃ 去离子水洗槽,收集澄清麦汁。将澄清麦汁于 100 ℃ 条件下煮沸 60 min,其间分 3 次添加体积分数为 0.2% 的酒花颗粒,煮沸结束后再次过滤麦汁,收集澄清麦汁,并将此次麦汁定型为 12 °P,备用。

1.3.2 酵母扩培 从斜面挑取适量上面啤酒酵母 WA-04 菌种,接种于 50 mL 麦汁培养基中,于 30 ℃,180 r/min 条件下摇床振荡培养 48 h 后,将其倒入 500 mL 麦汁培养基中,于 20 ℃ 条件下二次扩培 48 h。二次扩培结束后,于 8000 r/min 条件下离心 10 min,收集酵母菌泥用于小麦啤酒的酿造。运用血球计数板计算酵母菌泥的细胞数。

1.3.3 小麦啤酒的酿造工艺 量取 1 L 麦汁加入 2 L 三角瓶中,于 121 ℃ 条件下灭菌 15 min,冷却至 20 ℃,接种扩培后的上面啤酒酵母 WA-04,于 20 ℃ 恒温培养箱中发酵 120 h。

1.3.4 单因素试验 研究小麦芽添加量(35%、40%、45%、50% 和 55%)、酵母接种量(0.5×10^7 CFU/mL、 1.0×10^7 CFU/mL、 1.5×10^7 CFU/mL、 2.0×10^7 CFU/mL 和 2.5×10^7 CFU/mL)和发酵温度(16 ℃、18 ℃、20 ℃、22 ℃ 和 24 ℃)这 3 个主要影响因素对小麦啤酒(发酵 120 h 后)中 4-VG 质量浓度的影响。当单独研究小麦芽添加量时,酵母接种量为 1.5×10^7 CFU/mL,发酵温度为 20 ℃;当单独研究酵母接种量时,小麦芽添加量为 45%,发酵温度为 20 ℃;当单独研究发酵温度时,小麦芽添加量为 45%,酵母接种量为 1.5×10^7 CFU/mL。

1.3.5 响应面试验设计 根据以上单因素试验结果,采用全因子中心组合试验设计研究 A(小麦芽添加量)、B(酵母接种量)和 C(发酵温度)的线性、交互作用和平方效应,取 Y(4-VG 质量浓度)为响应值,设计 17 组试验优化酿造工艺条件,表 1 为响应面试验因素与水平。

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	A/%	B/(CFU·mL ⁻¹)	C/℃
-1	40	1.0×10 ⁷	18
0	45	1.5×10 ⁷	20
1	50	2.0×10 ⁷	22

1.3.6 相关指标测定 1)生物量:采用干重法测定酵母生物量,小麦啤酒发酵过程中每 24 h 取样一次,样品于 8000 r/min 条件下离心 10 min,用去离子水清洗 1 遍后收集菌体,并于 105 ℃ 条件下烘干至恒重。

2)表观浓度:采用密度法测定麦汁表观浓度,样品于 8000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液,利用密度瓶测定发酵液密度,换算后即得麦汁表观浓度。

3)4-VG 质量浓度:采用高效液相色谱(HPLC)法测定小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度。色谱柱为 C18 柱(4.6 mm×15 cm×0.45 μm),柱温为 20 ℃,进样量为 5.0 μL,流速为 0.6 mL/min,紫外分光光度计检测波长为 310 nm,流动相为 V(水):V(甲醇):V(磷酸)=64:5:1。

1.3.7 发酵动力学模型构建 1)酵母细胞生长动力学模型:采用 Logistic 方程描述酵母细胞生长动力学模型^[16],即

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \left(1 - \frac{X}{X_m}\right) X$$

Logistic 方程能很好地反映发酵过程中酵母菌体浓度增加对自身生长的抑制作用,其图像是一条典型的 S 曲线,可以用来拟合发酵过程中酵母的生长。对 Logistic 方程积分的代数方程为

$$X = \frac{X_0 e^{\mu_{\max} t}}{1 - \frac{X_0}{X_{\max}} (1 - e^{\mu_{\max} t})} \tag{1}$$

其中,μ_{max} 表示最大比生长速率/(h⁻¹),X 表示生物量/(g·L⁻¹),X₀ 表示初始生物量/(g·L⁻¹),X_{max} 表示最大生物量/(g·L⁻¹),t 表示发酵时间/h。

2)4-VG 生成动力学模型:采用 Luedeking-Piret 方程描述小麦啤酒发酵过程中酵母生成 4-VG 的过程^[17],即

$$\frac{dP}{dt} = \alpha \frac{dX}{dt} + \beta X$$

当 t = 0, P₀ = 0 时,Luedeking-Piret 方程可积分 为代数方程:

$$P = \alpha X_0 \left[\frac{e^{\mu_{\max} t}}{1 - \frac{X_0}{X_{\max}} (1 - e^{\mu_{\max} t})} - 1 \right] + \beta \frac{X_{\max}}{\mu_{\max}} \ln \left[1 - \frac{X_0}{X_{\max}} (1 - e^{\mu_{\max} t}) \right] \tag{2}$$

其中,P 表示 4-VG 质量浓度/(mg·L⁻¹),α 表示与菌体生长偶联的产物生成参数,β 表示与非伴随菌体生长相关的产物合成参数。当 α ≠ 0,β = 0 时,为 I 型偶联关系;当 α ≠ 0,β ≠ 0 时,为 II 型偶联关系;当 α = 0,β ≠ 0 时,为 III 型偶联关系。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果取平均值。采用软件 SPSS 22.0 进行数据处理与分析;采用软件 Design-Expert 8.0 进行响应面设计与分析;采用软件 Origin 9.0 进行发酵动力学非线性拟合与绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 小麦芽添加量 小麦芽添加量对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响见图 1。由图 1 可知,当小麦芽添加量为 35%~45%时,随着小麦芽添加量的增加,小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度逐渐增加,当小麦芽添加量为 45%时,4-VG 质量浓度最高,达到 2.13 mg/L。这是因为小麦芽中的水溶性阿拉伯木聚糖含量高于大麦芽,在麦汁糖化和发酵过程中,可与水溶性阿拉伯木聚糖结合的阿魏酸被大量释放合成 4-VG。然而,当小麦芽添加量继续增加时,4-VG 的质量浓度开始下降。较高水平的阿魏酸不一定会产生更高水平的 4-VG,这可能是因为过量的小麦芽水溶性成分(如酚酸、花青素、单宁等)会抑制酵母脱羧酶的活性,从而降低小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度。因此,选择小麦芽添加量为 45%作为后续响应面优化试验的中心点。

2.1.2 酵母接种量 酵母接种量对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响见图 2。由图 2 可知,酵母接种量为 0.5×10⁷~1.5×10⁷ CFU/mL 时,随着酵母接种

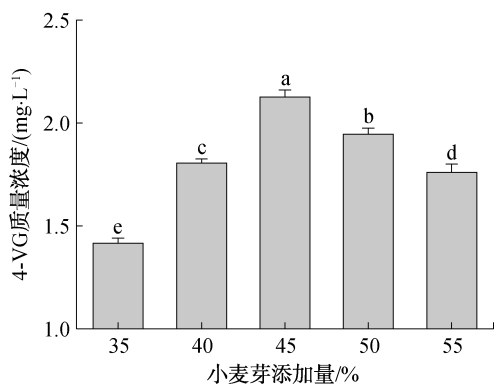


图 1 小麦芽添加量对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响

Fig. 1 Effect of wheat malt addition amount on 4-VG mass concentration in wheat beer

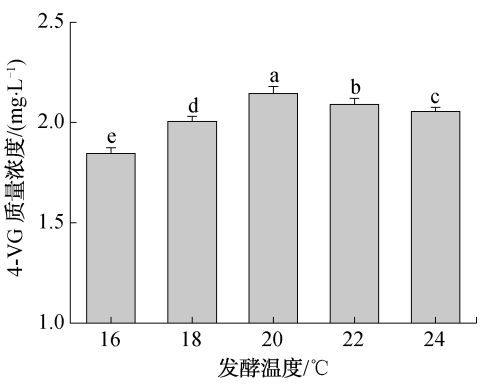


图 3 发酵温度对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响

Fig. 3 Effect of fermentation temperature on 4-VG mass concentration in wheat beer

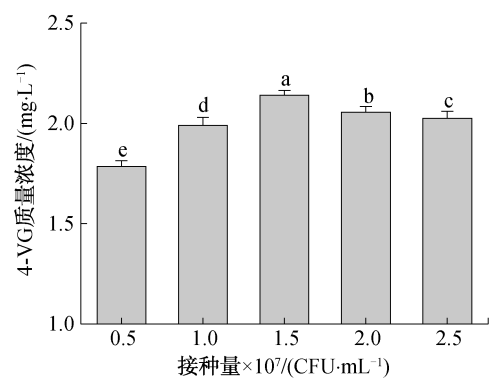


图 2 酵母接种量对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响

Fig. 2 Effect of yeast inoculation amount on 4-VG mass concentration in wheat beer

量的增加,小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度逐渐增加,当接种量为 1.5×10^7 CFU/mL 时,4-VG 质量浓度最高,达到 2.15 mg/L。然而,可能是因为阿魏酸含量有限,即使接种量进一步增加,小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度也不会随之再增加。因此,选择酵母接种量为 1.5×10^7 CFU/mL 作为后续响应面优化试验的中心点。

2.1.3 发酵温度 发酵温度对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度的影响见图 3。由图 3 可知,当发酵温度为 16~20 ℃时,随着发酵温度的升高,4-VG 质量浓度逐渐增加,当发酵温度为 20 ℃时,4-VG 质量浓度最高,达到 2.16 mg/L。这可能是因为发酵温度的升高导致苯基丙烯酸脱羧酶、酚酸脱羧酶和阿魏酰酯酶在上面啤酒酵母中的活性增加^[12]。随着发酵

温度的继续升高,4-VG 质量浓度略有下降。因此,选择发酵温度为 20 ℃作为后续响应面优化试验的中心点。

2.2 响应面优化试验结果分析

2.2.1 响应面试验结果与方差分析 响应面试验设计与结果见表 2。运用 Design-Expert 8.0 统计软件进行回归拟合,得到如下 4-VG 质量浓度(Y)的回归方程:

$$Y = 2.25 + 0.049A - 0.039B + 0.010C + 0.012AB - 0.040AC - 0.005BC - 0.29A^2 - 0.14B^2 - 0.13C^2$$

运用响应面分析法对回归方程进行方差分析,结果见表 3。由表 3 可知,该模型具有极显著性($P<0.01$),且失拟项不显著($P>0.05$),这说明预测值与试验值相关,拟合度较好,误差较小,使用该回归方程预测试验中 3 个因素与 4-VG 质量浓度之间的关系是可行的。模型的相关系数 $R^2 = 0.966\ 0$,校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.993\ 2$,通过试验建立的模型可以表示 91.65% 的响应值变化。根据显著性分析的结果可知,一次项 C 对 4-VG 质量浓度的影响不显著($P>0.05$);一次项 B,交互项 AB、BC 对 4-VG 质量浓度的影响显著($P<0.05$);一次项 A,交互项 AC,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对 4-VG 质量浓度的影响极显著($P<0.01$)。另外,通过比较该模型各因素的 F 值大小可判定各因素对试验结果的影响,即 $A>B>C$ (小麦添加量>酵母接种量>发酵温度)。

表2 响应面试验设计与结果

Table 2	Design and results of response surface test			
试验号	A	B	C	Y/(mg·L ⁻¹)
1	-1	1	0	1.65
2	0	1	-1	1.78
3	0	-1	-1	1.93
4	0	-1	1	1.98
5	0	0	0	2.15
6	1	-1	0	1.76
7	0	0	0	2.13
8	-1	-1	0	1.68
9	1	0	1	1.73
10	0	0	0	2.16
11	0	0	0	2.14
12	0	0	0	2.14
13	1	0	-1	1.82
14	-1	0	1	1.72
15	1	1	0	1.78
16	-1	0	-1	1.65
17	0	1	1	1.83

2.2.2 响应曲面图分析 图4所示响应曲面图直观地反映了小麦芽添加量、酵母接种量和发酵温度两两交互作用对4-VG质量浓度的影响,曲面图的曲面坡度越陡峭,等高线越趋近于椭圆,两因素的交互作用越明显^[18-19]。由图4可知,各响应曲面图均开口向下,说明在试验选择的取值范围内,存在最佳点可使4-VG质量浓度达到最大值。由图4b)可知,交互项AC响应曲面图呈现规则的山丘状,曲面倾

斜程度最大,且等高线呈椭圆形,说明小麦芽添加量和发酵温度交互作用显著,对4-VG质量浓度影响最大。由响应曲面图的曲面坡度可知,AC和AB对4-VG质量浓度的影响均大于BC,A对4-VG质量浓度的影响大于B和C,这与方差分析结果基本一致。

2.3 最佳发酵工艺的确定及验证实验结果分析

综合考虑各因素的交互作用,根据二次多项回归模型优化得到最佳发酵工艺条件为:小麦芽添加量45.91%,酵母接种量1.38×10⁷ CFU/mL,发酵温度20.05℃,此时,4-VG质量浓度的理论值为2.25 mg/L。为了便于试验操作,将最佳发酵工艺条件修正为小麦芽添加量45.9%,接种量1.4×10⁷ CFU/mL,发酵温度20.1℃。在该工艺条件下进行小麦啤酒发酵的验证实验,最终得到4-VG质量浓度的实际值为2.30 mg/L,该结果与预测理论值接近,比崔云前^[14]在实验室规模的发酵中得到的4-VG质量浓度(2.22 mg/L)略高。该发酵工艺酿造的小麦啤酒酯香浓郁,丁香味突出,具有典型的小麦啤酒香气。

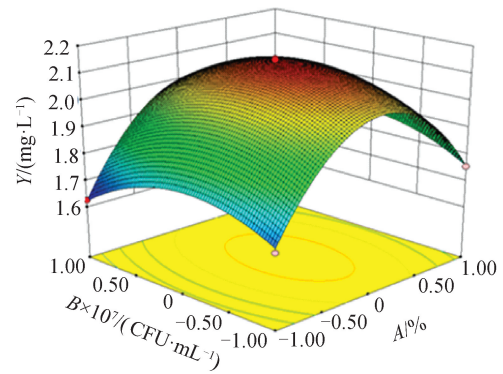
2.4 小麦啤酒发酵过程中相关指标变化分析

在最佳发酵工艺条件下,小麦啤酒发酵过程中的相关指标变化见图5。由图5可知,发酵过程中,酵母生物量逐渐增加,当发酵到96 h时,生物量达到最大值3.76 g/L,此后酵母生长进入稳定期。发酵开始时,4-VG即同时开始合成,且在72 h内快速

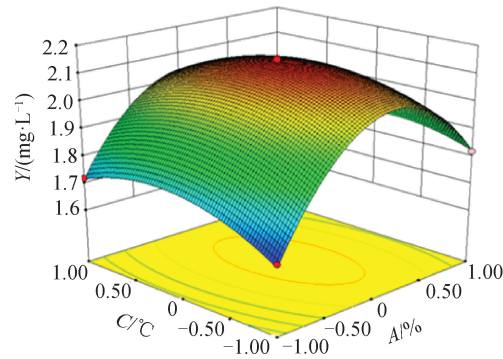
表3 回归方程模型方差分析

Table 3	Variance analysis of regression model					
方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P	显著性
模型	2.350 0	9	0.260 0	258.85	<0.000 1	**
A	0.086 0	1	0.086 0	85.44	<0.000 1	**
B	0.007 8	1	0.007 8	7.75	0.027 0	*
C	0.000 1	1	0.000 1	0.05	0.830 0	
AB	0.005 6	1	0.005 6	5.58	0.049 0	*
AC	0.026 0	1	0.026 0	25.40	0.001 5	**
BC	0.008 1	1	0.008 1	8.04	0.025 0	*
A ²	1.660 0	1	1.660 0	1 643.69	<0.000 1	**
B ²	0.240 0	1	0.240 0	235.15	<0.000 1	**
C ²	0.160 0	1	0.160 0	158.45	<0.000 1	**
残差项	0.007 1	7	0.001 0			
失拟项	0.004 8	3	0.001 6	2.79	0.170 0	不显著
纯误差项	0.002 3	4	0.000 6			
总误差项	2.350 0	16				

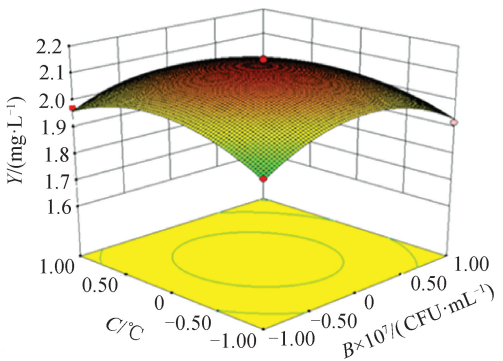
注:**为差异极显著(P<0.01);*为差异显著(P<0.05)。



a) 小麦芽添加量与酵母接种量的交互作用



b) 小麦芽添加量与发酵温度的交互作用



c) 发酵温度与酵母接种量的交互作用

图 4 各因素交互作用对小麦啤酒中 4-VG 质量浓度影响的响应曲面图

Fig. 4 Response surface plots of the influence of the interaction of various factors on 4-VG mass concentration in wheat beer

合成并在啤酒中大量积累。小麦啤酒一般发酵 120 h 左右,麦汁中的可发酵性糖即已消耗殆尽,酵母生物量不再增加,啤酒发酵结束;此时 4-VG 仍有少量合成,这可能是因为发酵结束时啤酒酵母中仍具有一定的活性脱羧酶。

2.5 发酵动力学模型分析

2.5.1 酵母细胞的生长动力学模型 采用 Origin

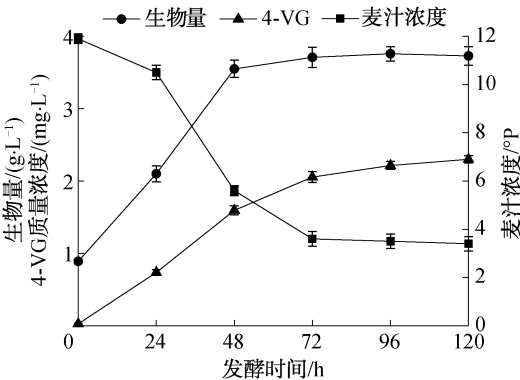


图 5 小麦啤酒发酵过程中的相关指标变化
Fig. 5 Related index in the fermentation process of wheat beer

9.0 软件对酵母细胞生长曲线试验值按公式①进行非线性拟合,结果见图 6。酵母细胞干重(X)随时间变化的函数为

$$X = \frac{0.89e^{0.065t}}{1 - 0.24(1 - e^{0.065t})}$$

由图 6 可知,该方程的拟合值与试验值能较好地吻合,模型的 $R^2 = 0.989$,说明 Logistic 方程可以很好地描述上面啤酒酵母 WA-04 的生长动力学过程。

2.5.2 4-VG 的生成动力学模型 式①中, $X_0 = 0.89 \text{ g/L}$, $X_{\max} = 3.98 \text{ g/L}$, $\mu_{\max} = 0.065 \text{ 1/h}$,对产物 4-VG 生成曲线试验值按公式②采用 Origin 9.0 软件进行非线性拟合,结果见图 7。

4-VG 质量浓度(P)随时间的变化函数为

$$P = 1.09 \left[\frac{e^{0.065t}}{1 - 0.24(1 - e^{0.065t})} - 1 \right] + 0.16 \ln[1 - 0.24(1 - e^{0.065t})]$$

式中, $\alpha = 1.22$, $\beta = 0.0028$ 。由图 7 可知,此方程的

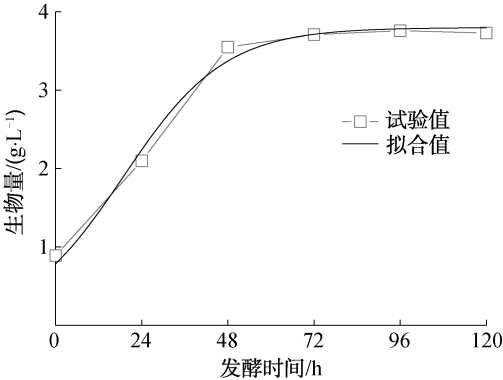


图 6 酵母细胞生长动力学模型中试验值与拟合值
Fig. 6 The experimental value and predicted value of yeast growth kinetic model

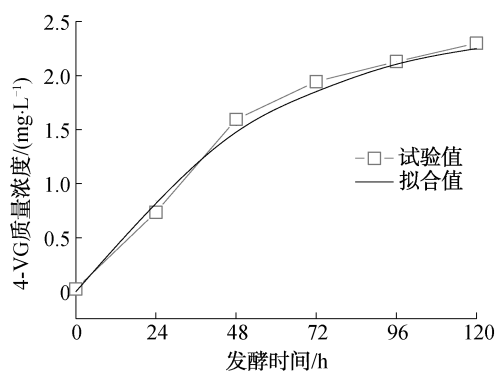


图7 4-VG生成动力学模型中
试验值与拟合值

Fig. 7 The experimental value and predicted value of
4-VG production kinetic model

拟合值与试验值能较好地吻合,模型的 $R^2 = 0.962$,说明 Luedeking-Piret 方程可以很好地描述小麦啤酒酿造过程中 4-VG 的生成动力学,可以预测酿造过程中的 4-VG 产量。但 β 值远小于 α 值,几乎等于 0,因此,上面啤酒酵母 WA-04 生成 4-VG 的动力学模型属于 I 型偶联关系。

3 结论

本文通过小麦啤酒发酵实验,对可能影响 4-VG 质量浓度的因素进行了实验室小试研究,得到的小麦啤酒最佳酿造工艺条件为小麦芽添加量 45.9%,酵母接种量 1.4×10^7 CFU/mL,发酵温度 20.1 °C。在此条件下,酿造的小麦啤酒中 4-VG 的质量浓度最高,为 2.30 mg/L。构建的上面啤酒酵母 WA-04 的生长动力学模型及 4-VG 的生成动力学模型表明,上面啤酒酵母 WA-04 生成 4-VG 的动力学模型属于 I 型偶联关系。后续还需对小麦啤酒进行深入研究,在实验室小试酿造良好的基础上,通过中试试验继续进行放大验证,并对小试酿造确定的工艺条件进行二次检验,为口感醇厚、丁香味适度的高品质小麦啤酒的工业化酿造提供一定的技术参考。

参考文献:

[1] 隋明,岳文喜,张崇军,等. 小麦啤酒生产工艺关键控制点的研究[J]. 粮食与食品工业, 2018, 25(6): 35-39.
[2] 王成,林盛恒,刘静,等. 小麦啤酒“酸感”形成分析及其调控技术研究[J]. 中外酒业, 2020

(23): 7-13.

[3] PICARIELLO G, MAMONE G, CUTIGNANO A, et al. Proteomics, peptidomics, and immunogenic potential of wheat beer(Weissbier) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(13): 3579-3586.
[4] 刘春晓. 小麦啤酒风味物质的形成特性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2020.
[5] 杨浩. 小麦啤酒酵母的筛选及发酵特性的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
[6] 莫新良,徐岩,范文来. 黄酒储存期间 4-乙烯基愈疮木酚和香草醛的变化及影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2): 29-34.
[7] 李青卓,王嘉瑞,张小龙,等. 风味物质 4-乙烯基愈创木酚的研究进展[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 15-19.
[8] 陈锡伟. HPLC 法测定小麦啤酒中阿魏酸的含量[J]. 中外酒业, 2019(15): 24-27.
[9] 成冬冬. 比利时/德国小麦啤酒风味物质差异的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2018.
[10] 张崇真. 提高焦香麦芽酿造小麦啤酒中 4VG 含量的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017.
[11] LENTZ M. The impact of simple phenolic compounds on beer aroma and flavor[J]. Fermentation, 2018, 4(1): 2-13.
[12] CUI Y Q, WANG A P, ZHANG Z, et al. Enhancing the levels of 4-vinylguaiacol and 4-vinylphenol in pilot-scale top-fermented wheat beers by response surface methodology[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2015, 121(1): 129-136.
[13] CHEN P, DONG J J, YIN H, et al. Single nucleotide polymorphisms and transcription analysis of genes involved in ferulic acid decarboxylation among different beer yeasts[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2015, 121(4): 481-489.
[14] 崔云前. 通过基因克隆和工艺优化提高上面发酵小麦啤酒 4-乙烯基愈创木酚含量的研究[J]. 啤酒科技, 2016(4): 25-41.
[15] 吴幼茹,江伟,刘翔,等. 气相色谱-嗅闻-质谱分析浅色麦芽、焦香麦芽及黑麦芽中香气成

分[J]. 食品与发酵工业,2016,42(7):193-201.

[16] 蒋艾廷,李新玲,姜淑娟,等. 一株优选酿酒酵母增殖培养条件优化及发酵动力学模型的构建[J]. 食品科学技术学报,2018,36(1):45-52.

[17] 葛慈斌,蓝江林,刘波,等. 解淀粉芽胞杆菌 FJAT-8754 产纤维素酶和淀粉酶发酵动力学

模型的构建[J]. 福建农业学报,2019,34(6):697-704.

[18] 李岩,姜鑫,黄剑,等. 响应面法优化刺梨精酿啤酒酿造工艺[J]. 食品工业,2021,42(4):170-174.

[19] 邓鸿钰. 小麦啤酒多菌株发酵工艺及风味物质研究[D]. 济南:齐鲁工业大学,2021.

Optimization of 4-vinylguaiacol production by *Saccharomyces cerevisiae* and fermentation kinetic model of wheat beer brewing

ZHAO Ting,JIANG Lin,JIA Jing,FU Wei,YU Zhimin
School of Biological Engineering,Dalian Polytechnic University,Dalian 116034,China

Abstract:4-vinylguaiacol (4-VG) is an important flavor substance in wheat beer. In order to promote the production of 4-VG, the brewing process of wheat beer was optimized by single factor test combined with response surface methodology with barley malt and wheat malt as raw materials and WA-04 as fermentation strain. The fermentation dynamic model was established by studying the dynamic changes of 4-VG in the fermentation process. The results showed that the best technological conditions of wheat beer brewing were wheat malt addition amount of 45.9%, yeast inoculation amount of 1.4×10^7 CFU/mL and fermentation temperature of 20.1 ℃. Under these conditions, the 4-VG mass concentration in wheat beer reached 2.30 mg/L. According to the WA-04 growth kinetic model and 4-VG formation kinetic model, the fermentation kinetic model of 4-VG formation by beer yeast belonged to type I coupling relationship.

Key words:wheat beer;*Saccharomyces cerevisiae*;4-vinylguaiacol;fermentation kinetic model

(责任编辑:杨晓娟)

本刊数字网络传播声明

本刊已许可中国知网,万方数据资源系统,维普网,国家科技学术期刊开放平台,博视网,超星,中国科技论文在线,中教数据库,EBSCOhost,Ulrichs,FSTA 等在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。