

小白杏果酒发酵过程中品质指标变化,相关性分析及发酵动力学模型建立

濮希蕾^{1,2}, 房丹丹^{1,2}, 马易昱^{1,2}, 司旭鹏^{1,2}, 方贵平^{1,2}, 裴龙英^{1,2*}

(1.新疆理工学院 食品安全与营养实验教学中心,新疆 阿克苏 843100;
2.新疆理工学院 慕萨莱斯品质检测重点实验室,新疆 阿克苏 843100)

摘要:该研究以新疆小白杏为原料发酵制备小白杏果酒,监测小白杏果酒发酵过程中理化指标的动态变化规律并进行相关性分析。利用Logistic模型、SGompertz模型、DoseResp模型和Boltzmann模型对其发酵动力学进行非线性拟合。结果表明,小白杏果酒酒精度为11.7%vol,酵母菌活菌数为 10.38×10^7 CFU/mL,总糖含量为3.98 g/L,pH为3.89,可滴定酸含量为8.5 g/L。果酒中主要含有奎宁酸、苹果酸、柠檬酸等有机酸,含量分别为1.29 g/L、2.95 g/L、4.13 g/L。相关性分析表明,酵母菌活菌数与总糖和苹果酸呈极显著负相关($P<0.01$);总糖与酒精度呈高度显著负相关($P<0.001$),与苹果酸呈极显著正相关($P<0.01$);酒精度与酒石酸呈极显著正相关($P<0.01$)。发酵动力学分析表明拟合酵母菌活菌数、总糖含量和酒精度变化的最佳模型分别为DoseResp模型、Boltzmann模型和Logistic模型,相关系数 R^2 均 >0.99 ,模型预测值与试验值误差均 $\leq 25\%$,说明模型能够科学准确的模拟小白杏果酒发酵过程中各项关键指标的变化。该试验结果可为小白杏果酒的酿造提供一定的数据支撑。

关键词:小白杏果酒;有机酸;发酵动力学;理化指标;相关性分析

中图分类号:TS262 文章编号:0254-5071(2025)12-0218-07 doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.12.031

引文格式:濮希蕾,房丹丹,马易昱,等.小白杏果酒发酵过程中品质指标变化,相关性分析及发酵动力学模型建立[J].中国酿造,2025,44(12):218-224.

Changes of quality indicators during fermentation process of small white apricot wine, correlation analysis and establishment of fermentation kinetics model

PU Xilei^{1,2}, FANG Dandan^{1,2}, MA Yiyang^{1,2}, SI Xupeng^{1,2}, FANG Guiping^{1,2}, PEI Longying^{1,2*}

(1.Center for Experimental Instruction in Food Safety and Nutrition, Xinjiang Institute of Technology, Akesu 843100, China;
2.Key Laboratory for Quality Testing of Musalais, Xinjiang Institute of Technology, Akesu 843100, China)

Abstract:The small white apricot wine was prepared using Xinjiang small white apricot as the raw material. The dynamic changes of physicochemical indicators during the fermentation process of the small white apricot wine were monitored and a correlation analysis was conducted. Nonlinear fitting of its fermentation kinetics was carried out using the Logistic model, the SGompertz model, the DoseResp model and the Boltzmann model. The results showed that the alcohol content of the small white apricot wine was 11.7%vol, the viable yeast count was 10.38×10^7 CFU/ml, the total sugar content was 3.98 g/L, the pH was 3.89, and the titratable acid content was 8.5 g/L. The fruit wine mainly contained quinic acid, malic acid, and citric acid, with contents of 1.29 g/L, 2.95 g/L, and 4.13 g/L, respectively. The correlation analysis showed that the viable yeast count was extremely significantly negatively correlated with total sugar and malic acid ($P<0.01$), total sugar was highly extremely significantly negatively correlated with alcohol content ($P<0.001$) and extremely significantly positively correlated with malic acid ($P<0.01$), alcohol content was extremely significantly positively correlated with tartaric acid ($P<0.01$). The fermentation kinetics analysis indicated that the optimal models for fitting the changes in viable yeast count, total sugar content, and alcohol content were the DoseResp model, Boltzmann model, and Logistic model, respectively. The correlation coefficients R^2 were all >0.99 , and the error between the predicted values and the experimental values was $\leq 25\%$, indicating that the models could scientifically and accurately simulate the changes of key indicators during the fermentation process of the small white apricot wine. The experimental results could provide certain data support for the brewing of small white apricot wine.

Key words:small white apricot wine; organic acidity; kinetics of fermentation; physical and chemical indicators; correlation analysis

杏(*Prunus armeniaca* L.)属蔷薇科李亚科杏属植物,广泛分布于世界温带地区,在我国主要分布在新疆、山东、山西、甘肃、陕西等地^[1],是温带地区重要的核果类水果^[2]。新疆因其冬季寒冷、夏季酷热、阳光充沛、气候干旱等独特的气候条件,已成为杏树生长的优生区和原生区^[3],种植面积约为11.126 4万 hm^2 ,占全国的37.2%,年产量93.308 8万t,占全国46.4%,且种植品种多达200种,主要有小白杏、蜀上干、李广杏等^[4]。其中小白杏凭借种植面积广、产量大、资

收稿日期:2025-04-09 修回日期:2025-08-06
基金项目:新疆理工学院校级一般项目(ZY202404);新疆理工学院校级团队项目(ZT202101)
作者简介:濮希蕾(1996-),男,助教,硕士,研究方向为果蔬加工及风味研究。
*通讯作者:裴龙英(1990-),女,副教授,博士,研究方向为食品风味及功能性成分。

源分布相对集中等优势,已成为我国新疆地区的特产和重要经济植物之一^[5]。小白杏果实呈卵圆形,浅黄色,果肉黄色细腻,皮薄汁多,入口甘甜爽口,香甜可口^[6],富含钙、磷、铁和维生素等多种营养成分,具有滋养心脏,促进血液循环,滋润肠胃,助消化等功效^[7-8]。小白杏中的有机酸含量较高,通常为1.5%~3.5%^[9],且有机酸种类较其他水果更加丰富。但由于小白杏属呼吸跃变型水果,果实采后易软化,不耐贮运,限制了小白杏加工产品的发展。

果酒是酵母菌利用水果中的糖分发酵而成的酒精性饮料,富含水果特有的风味,同时还保留水果原有的有益成分和功效因子^[10]。目前,我国正在提倡逐步以低度酒代替高度酒,饮用果酒已成为人们追求健康和时尚的消费趋势。将小白杏作为发酵原料制备果酒不仅保留了果实本身丰富的营养价值和独特的风味,并且通过酵母菌的发酵赋予其特殊的发酵风味,在我国果酒市场颇受人们的喜爱^[10]。此外,小白杏发酵成果酒还能改善其不耐贮藏和运输的缺陷,扩大销售市场。近年来,许多学者开始致力于研究杏果酒的加工,娄静文^[6]选用小白杏为原料,对杏果酒发酵工艺进行优化,得到的杏果酒果香浓郁、口感柔和、颜色浅黄,具有杏典型特征;綦嘉丽^[11]对杏子果酒自然发酵过程中酵母多样性进行了研究并筛选出了耐受性较强的酵母菌株。

发酵动力学通过研究发酵过程中菌体生长、底物消耗、以及产物合成等参数之间的动态变化规律,并利用数学语言将这些关系进行表达^[12],以达到对参数更精准的预测,这对监测发酵过程、规模化放大生产以及连续发酵等过程具有重要指导意义^[13]。目前,果酒发酵动力学的研究已有相关报道,如菠萝蜜果酒^[14]、芒果果酒^[15]、红心火龙果果酒^[16]等。这些研究通过相关模型(Logistic、SGompertz、Boltzmann和DoseResp)描述果酒发酵过程中酵母菌生长、基质消耗和产物生成的变化规律,从而科学的模拟和预测果酒的发酵过程。但由于果酒发酵动力学因其原料的不同,导致各个模型之间表现出一定的差异性,有关小白杏果酒发酵动力学的研究还鲜见报道。

本试验以小白杏为原料发酵制备小白杏果酒,监测果酒中各项理化指标动态变化,并利用高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)技术测定其中有机酸的种类及含量变化。采用发酵动力学模型(Logistic模型、SGompertz模型、DoseResp模型和Boltzmann模型)对小白杏果酒发酵过程中酵母菌生长、产物生成和基质消耗进行非线性拟合,确定不同参数最佳拟合模型,以期为小白杏果酒工业化生产和品质控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小白杏(可溶性固形物含量约为15 °Bx):新疆石河子

市(原产地为新疆轮台县)。

酿酒活性干酵母CEC01:安琪酵母股份有限公司;白砂糖(食品级):山东星光糖业有限公司;果胶酶(30 000 U/g):浙江一诺生物科技有限公司。偏重亚硫酸钾(分析纯):茂名市雄大化工有限公司;苹果酸、乳酸、柠檬酸、琥珀酸、酒石酸、奎宁酸、草酸标准品(均为色谱纯):上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

MJ-BL1214A榨汁机:广东美的生活电器制造有限公司;WS108手持式折光仪:河北润联科技开发有限公司;pHS-3C数字pH计、0~40%vol酒精计、0.8~1.0比重计:上海益天科学仪器有限公司;UV-1100紫外可见分光光度计:上海佑科仪器仪表有限公司;BSP-400恒温培养箱、SHZ-B恒温振荡器:上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;H4-20KR台式高速冷冻离心机:湖南可成仪器设备有限公司;LC-2010AHT高效液相色谱仪:日本岛津公司;Diamonsil C₁₈液相色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm):北京迪科马科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 小白杏果酒发酵工艺流程与操作要点^[17]

新鲜小白杏→挑选→去核打浆→酶解→成分调整→接种→发酵→澄清→成品

原料预处理:挑选新鲜,无损伤的小白杏,清洗、去核后用榨汁机以料液比(g:mL)为2:1进行打浆,直至看不到明显果肉纤维停止。

酶解:添加0.04%的果胶酶,45 °C酶解2.5 h。

成分调整:用白砂糖调整杏浆糖度至22%,并加入SO₂含量为60 mg/L的偏重亚硫酸钾,用于抑制其他微生物的生长。

酵母活化:准确称量1 g酵母菌,倒入200 mL的小白杏浆中,于37 °C的恒温振荡水浴锅中活化30 min。

接种发酵:取200 mL调整好的小白杏浆,添加200 mg/L活化后的酿酒酵母,于22 °C恒温发酵8 d,待发酵结束(发酵液比重<0.996)后置入4 °C冰箱保存备用。

澄清:将发酵结束的小白杏果酒用双层纱布进行过滤除去酒泥,然后装入干净密封的玻璃瓶中进行自然澄清,每隔一周分离上清液直至不产生沉淀,即得成品。

1.3.2 发酵动力学模型建立方法

参考张琪等^[18]的方法进行发酵动力学模型拟合。于发酵0、2 d、4 d、6 d、8 d取样后,部分发酵液直接用来测定其中的酵母菌活菌数,其余发酵液经10 000 r/min离心10 min后,取上清液测定总糖含量、pH、可滴定酸、酒精度。采用Logistic模型、SGompertz模型、DoseResp和Boltzmann模型对小白杏果酒发酵过程中酵母菌生长、酒精生成及总糖消耗的规律进行非线性拟合,并比较不同模型的相关系数(R²),相关系数(R²)越大,表明模型的拟合度越好^[19],选择相关系数

(R^2)最大的模型模拟发酵过程,并将模型拟合值和试验测定值进行比较分析。

1.3.3 分析检测

(1)酵母菌活菌数及理化指标的测定

采用平板计数法测定酵母菌活菌数^[17];采用pH计测定小白杏果酒的pH值;采用手持折光仪测定小白杏果酒的可溶性固形物含量;可滴定酸、总糖以及酒精度参照GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》进行测定。

(2)有机酸含量的测定

参考郑惠文等^[2]的研究,选取小白杏及小白杏果酒中含量最多并且能够准确定性和定量的7种有机酸对其进行含量测定。参考邓红梅等^[20]的方法,并略作修改。取4 mL果酒样品于5 mL离心管中,在8 000 r/min条件下离心10 min,收集上清液,用超纯水稀释20倍,再经0.45 μm 有机滤膜过滤后直接进样。在具有光电二极管阵列(photodiode array detector, PAD)检测器的HPLC系统上,使用Diamondsil C₁₈色谱柱进行测定。柱温为30 $^{\circ}\text{C}$,进样量10 μL ,流速0.5 mL/min,流动相A为甲醇,流动相B为1%的磷酸水溶液(pH=2.0),流动相A:B体积比为5:95 (V:V),等度洗脱。

定性分析:采用标准品色谱图保留时间比对法进行定性分析。

定量分析:采用外标法定量,有机酸标准品标准曲线回归方程及相关系数见表1。

表1 7种有机酸标准曲线的回归方程		
有机酸标品	标准曲线回归方程	相关系数(R^2)
奎宁酸	$Y=405\ 419X-464.73$	0.997 7
酒石酸	$Y=1\ 047\ 786.25X-209.52$	0.999 4
苹果酸	$Y=510\ 878X+2\ 974.60$	0.998 7
乳酸	$Y=352\ 095X+2\ 936.90$	0.999 5
草酸	$Y=5\ 171\ 407.81X-24\ 146.59$	0.999 1
柠檬酸	$Y=579\ 209X+861.07$	0.997 6
琥珀酸	$Y=290\ 500X+2\ 219.00$	0.999 0

1.3.4 数据处理

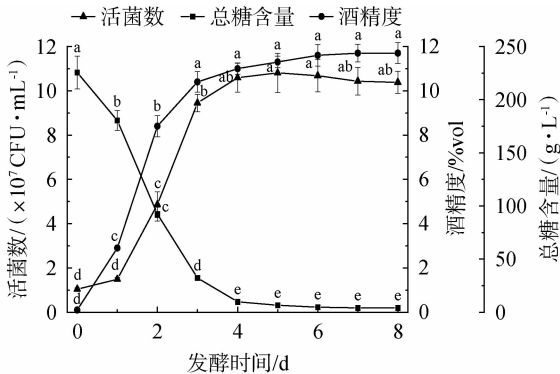
所有试验均重复3次。所得试验数据用“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示。利用IBM SPSS Statistics 20.0软件进行Duncan多重比较以及显著性分析;并借助Origin 2019软件进行发酵动力学的模拟及绘图。

2 结果与分析

2.1 小白杏果酒发酵过程中酵母菌活菌数、酒精度和总糖含量的变化规律

小白杏果酒发酵过程中酵母菌活菌数、酒精度和总糖含量的变化趋势见图1。由图1可知,酵母菌活菌数变化曲线符合“S”型生长曲线,发酵0~1 d,活菌数变化不大,发酵

1~5 d,活菌数呈现迅速增长的变化趋势,第5天时达到峰值,为 10.81×10^7 CFU/mL,发酵5~8 d,呈现缓慢下降的趋势,第8天时,活菌数为 10.38×10^7 CFU/mL。酒精度也有类似的变化现象,伴随着发酵时间的延长,酒精度呈先快速增加,之后又缓慢增加直至平稳的变化趋势,第8天时,酒精度为11.7%vol。总糖含量的变化规律与之相反,先迅速下降,后趋于平缓至发酵结束,含量为3.98 g/L。上述变化趋势可能是因为酵母菌在发酵初期,正处于适应生长环境,储备能量和合成代谢所需物质的过程,当酵母菌适应环境后,基质中糖、氮源等营养物质为酵母菌提供了理想的繁殖条件,细胞分裂加快,数量呈指数增长,大量生成乙醇^[21]。当糖消耗殆尽、酒精度过高,有机酸不断积累,导致酵母菌的生长受到抑制,死亡数量超过新生数量,最终数量减少^[17]。



同一指标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。
图1 小白杏果酒发酵过程中酵母菌活菌数、酒精度和总糖含量的变化
Fig. 1 Changes in viable yeast count, alcohol content and total sugar contents during fermentation process of small white apricot wine

2.2 小白杏果酒发酵过程中可滴定酸和pH值的变化规律

果酒发酵过程中,可滴定酸含量和pH值不仅影响酵母菌的生长繁殖,对果酒口感的影响也较大,可滴定酸含量和pH值的监测对果酒的品质具有重要意义^[22]。小白杏果酒发酵过程中可滴定酸含量和pH值的变化见图2。

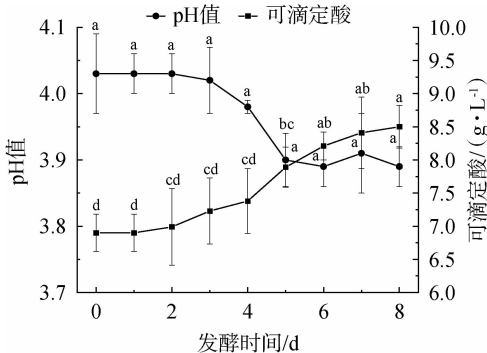


图2 小白杏果酒发酵过程中可滴定酸含量和pH值的变化
Fig. 2 Change of titrate acid contents and pH value during fermentation process of small white apricot wine

由图2可知,在发酵0~1 d,可滴定酸含量和pH值没有明显变化,这可能是因为前期酵母处于繁殖阶段,发酵液中酸度保持稳定^[23];在发酵2~6 d,可滴定酸含量快速增加,pH值也快速降低,这是因为酵母菌不断生长累积生成有机酸^[23];发酵6~8 d,可滴定酸含量和pH值变化比较缓慢,8 d时,小白杏果酒可滴定酸含量和pH值分别为8.5 g/L和3.89。这可能是由于发酵系统中总糖被酵母菌消耗殆尽,酵母菌进入衰退期,产酸能力也逐渐减弱^[23]。总的来说,小白杏果酒在发酵过程中酸度有所增加,这在一定意义上丰富了小白杏果酒的口感和风味。

2.3 小白杏果酒发酵过程中有机酸含量的变化规律

有机酸的含量和种类是评价果酒品质的重要因素,果酒中的有机酸直接来自果实,或者是酒精和苹果酸-乳酸发酵过程产生的微生物代谢的结果^[24]。因此,通过高效液相色谱法对小白杏果酒发酵过程中的有机酸进行定性定量分析,结果见表2。由表2可知,苹果酸和柠檬酸是小白杏果实中主要的有机酸。发酵0~4 d,柠檬酸、乳酸、草酸和琥珀酸含量均显著增加($P<0.05$),奎宁酸含量也有所增加,苹果酸含量显著降低($P<0.05$);发酵4~8 d,苹果酸含量持续降低,柠檬酸、乳酸、草酸、琥珀酸和奎宁酸含量变化不显著($P>0.05$),发酵8 d时,7种有机酸的含量分别为1.29 g/L、0.02 g/L、2.95 g/L、0.91 g/L、0.1 g/L、4.13 g/L和0.32 g/L。而在整个发酵过程中酒石酸含量基本保持不变(0.01~0.02 g/L)。在发酵0~4 d,柠檬酸大量存在于小白杏果实中,随着发酵进行不断释放到发酵基质中,并且柠檬酸是三羧酸循环的中间产物,能够促进乳酸的分解,因此其含量不断增加^[25];琥珀酸是酵母菌在厌氧环境下的代谢产物^[26];草酸含量在发酵过程中的增加可能源于发酵液pH值的下降或酶解作用,释放出草酸根离子,进而以游离草酸形式存在于发酵液中;而苹果酸和乳酸含量的变化源于苹果酸-乳酸发酵,这个过程中苹果酸会被脱羧形成乳酸,在此阶段果酒的酸度会降低,使得果酒口感更加柔和^[27]。综上,发酵提升了果酒中有机酸的含量,使得小白杏果酒的风味更加丰富和突出。

表2 小白杏果酒发酵过程中有机酸含量的变化

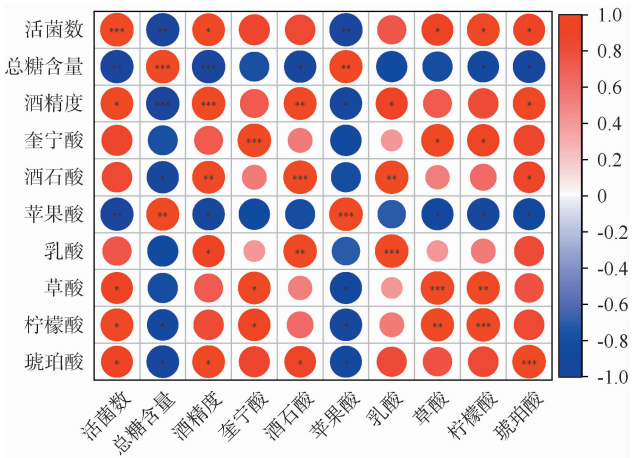
Table 2 Changes of organic acids contents during fermentation process of small white apricot wine

有机酸	质量浓度/(g·L ⁻¹)				
	0	2 d	4 d	6 d	8 d
奎宁酸	0.95±0.14b	0.94±0.13b	1.12±0.18ab	1.19±0.01ab	1.29±0.19a
酒石酸	0.01±0.01a	0.02±0.01a	0.02±0.01a	0.02±0.01a	0.02±0.01a
苹果酸	5.02±0.60a	4.19±0.53b	3.14±0.14c	2.61±0.84d	2.95±0.29cd
乳酸	0.16±0.02b	1.04±0.13a	1.02±0.12a	0.91±0.11a	0.91±0.10a
草酸	0.04±0.01b	0.03±0.02b	0.09±0.01a	0.10±0.01a	0.10±0.01a
柠檬酸	2.02±0.05b	2.12±0.31b	3.97±0.23a	3.91±0.33a	4.13±0.74a
琥珀酸	0.15±0.02c	0.24±0.03b	0.26±0.04ab	0.28±0.03ab	0.32±0.05a
总和	8.35±0.85b	8.58±1.16b	9.62±0.73a	9.02±1.34a	9.72±1.39a

注:同一行不同小写字母表示各样品间差异显著($P<0.05$)。

2.4 小白杏果酒发酵过程中酵母菌活菌数、酒精度、总糖和有机酸之间的相关性分析

小白杏果酒发酵过程中活菌数、酒精度、总糖和有机酸之间的相关性见图3。红色圆圈表示正相关、蓝色表示负相关,由图3可知,活菌数与总糖含量和苹果酸含量呈极显著负相关($P<0.01$),与酒精度、草酸、柠檬酸和琥珀酸含量呈显著正相关($P<0.05$);总糖含量与酒精度呈高度显著负相关($P<0.001$),与酒石酸、柠檬酸和琥珀酸含量呈显著负相关性($P<0.05$),与苹果酸含量呈极显著正相关($P<0.05$);酒精度与酒石酸含量呈极显著正相关($P<0.01$),与乳酸和琥珀酸含量呈显著正相关($P<0.05$),与苹果酸含量呈显著负相关($P<0.05$)。以上不同物质间的相关性均与三羧酸循环和苹果酸-乳酸发酵有关^[28]。而乳酸与酒石酸呈显著正相关($P<0.05$),这是由于乳酸会将酒石酸降解成乙酸和乳酸^[29]。



“*”表示显著相关($P<0.05$),“**”表示极显著相关($P<0.01$),
“***”表示高度显著相关($P<0.001$)。

图3 小白杏果酒中酵母菌活菌数、酒精度、总糖和有机酸之间的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of viable yeast count, alcohol content, total sugar and organic acid in small white apricot wine

2.5 发酵动力学模型的建立及验证

2.5.1 酵母菌的生长动力学模型

通过Logistic模型、SGompertz模型和DoseResp模型分别对酵母菌生长过程进行拟合,拟合方程和相关系数见表3,拟合曲线见图4。

表3 小白杏果酒发酵过程中酵母菌活菌数的拟合方程及其相关系数
Table 3 Fitting equation and correlation coefficient of the viable yeast count during fermentation process of small white apricot wine

模型	拟合方程	相关系数(R^2)
Logistic	$y = \frac{1.214\ 37 - 10.625\ 5}{1 + \left(\frac{X}{2.156\ 32}\right)^{6.086\ 15}} + 10.625\ 5$	0.998 1
SGompertz	$y = 10.750\ 65e^{-e^{-(1.292\ 26 \times (x + 1.692\ 2))}}$	0.982 0
DoseResp	$y = 0.970\ 89 + \frac{9.624\ 63}{1 + 10^{1.057\ 48 \times (2.162\ 35X)}}$	0.998 9

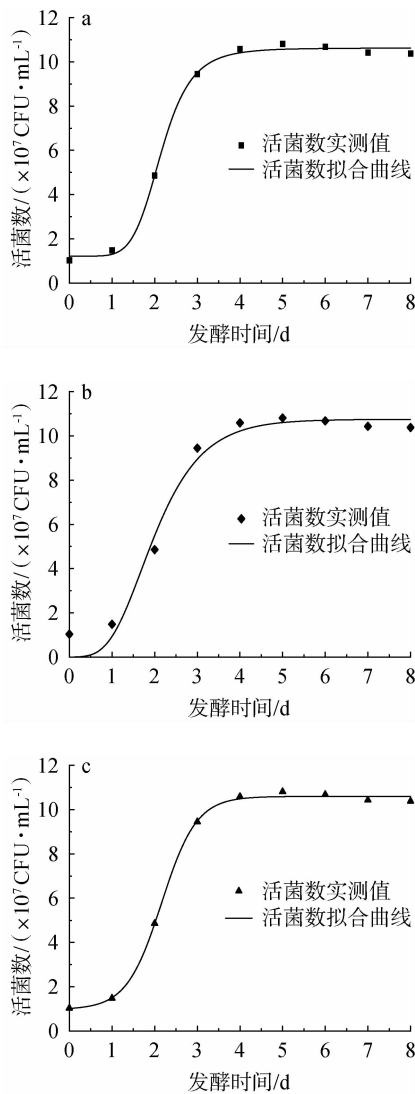


图4 小白杏果酒发酵过程中酵母活菌数Logistic(a)、SGompertz(b)、DoseResp(c)模型拟合曲线图

Fig. 4 Logistic (a), SGompertz (b) and DoseResp (c) models fitting curve plots of the viable yeast count of small white apricot wine during fermentation process

由图4及表3可得,三个模型的相关系数(R^2)分别为0.998 1、0.982 0和0.998 9。DoseResp模型的相关系数(R^2)最高,说明该模型对酵母菌生长量的拟合性最好,因此选用该模型对酵母菌活菌数的变化过程进行拟合。

2.5.2 乙醇生成动力学模型

通过Logistic模型、SGompertz模型和DoseResp模型分别对乙醇生成过程进行拟合,拟合方程和相关系数见表4,拟合曲线见图5。

由图5及表4可知,3个模型的相关系数(R^2)分别为0.999 7、0.998 3和0.996 9。Logistic模型的相关系数(R^2)最高,说明该模型对乙醇生成量的拟合性最好,因此选用该模型对酒精生成的变化过程进行拟合。

表4 小白杏果酒发酵过程中酒精度的拟合方程及相关系数
Table 4 Fitting equation and correlation coefficients of the alcohol content during fermentation process of small white apricot wine

模型	拟合方程	相关系数(R^2)
Logistic	$y = \frac{0.084 - 11.738 44}{1 + \left(\frac{X}{1.475 21}\right)^{2.895 91}} + 11.738 44$	0.999 7
SGompertz	$y = 11.518 66e^{(-1.380 37 \times (x + 1.217 89))}$	0.998 3
DoseResp	$y = 0.900 78 + \frac{12.363 75}{1 + 10^{0.760 42 \times (1.429 53 - X)}}$	0.996 9

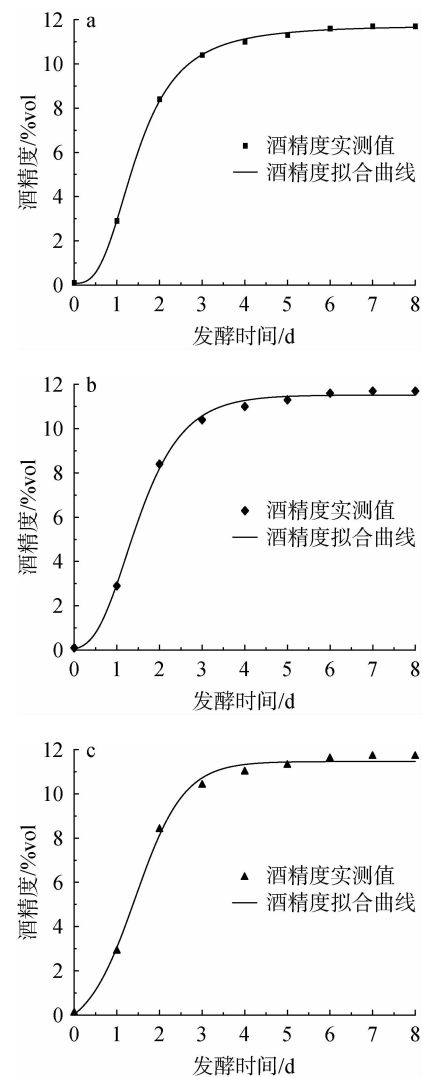


图5 小白杏果酒发酵过程中酒精度Logistic(a)、SGompertz(b)、DoseResp(c)模型拟合曲线图

Fig. 5 Logistic (a), SGompertz (b) and Dose-Response (c) models fitting curve plots of the alcohol content of small white apricot wine during fermentation process

2.5.3 总糖消耗动力学模型

通过Logistic模型、Boltzmann模型和DoseResp模型分别对总糖消耗过程进行拟合,拟合方程和相关系数见表5,拟合曲线见图6。由图6及表5可知,三个模型的相关系数(R^2)

分别为0.997 8、0.999 9和0.999 8。Boltzmann模型的相关系数(R^2)最高,说明该模型对总糖消耗量的拟合性最好,因此选用该模型对总糖消耗的变化过程进行拟合。

表5 小白杏果酒发酵过程中总糖含量的拟合方程及其相关系数
Table 5 Fitting equation and correlation coefficient of total sugar content during fermentation process of small white apricot wine

模型	拟合方程	相关系数(R^2)
Logistic	$y = \frac{223.486\ 79 + 2.066\ 03}{1 + \left(\frac{X}{1.718\ 4}\right)^{2.895\ 14}} - 2.066\ 03$	0.997 8
Boltzmann	$y = \frac{238.369\ 12}{1 + e^{\frac{x - 1.663\ 57}{0.646\ 62}}} + 4.32568$	0.999 9
DoseResp	$y = 4.325\ 68 + \frac{238.369\ 12}{1 + 10^{(-0.671\ 64 \times (1.663\ 57 - X))}}$	0.999 8

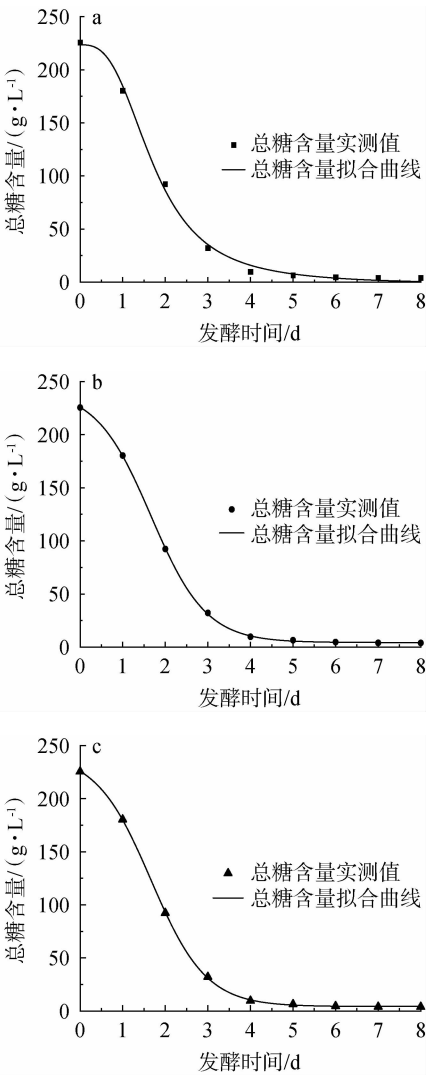


图6 小白杏果酒发酵过程中总糖含量Logistic(a)、Boltzmann(b)、DoseResp(c)模型拟合曲线图

Fig. 6 Logistic (a), Boltzmann (b) and Dose-Response (c) models fitting curve plots of the total suger content of small white apricot wine during fermentation process

2.5.4 发酵动力学模型验证

通过对比三种不同模型的相关系数(R^2),最终选择DoseResp模型拟合酵母菌活菌数的变化,Logstic模型拟合酒精度的变化,Boltzmann模型拟合总糖含量的变化,进行试验值与拟合值的误差分析,结果见表6。由表6可知,模型的活菌数、酒精度、总糖含量的预测值和试验值之间的误差均 $\leq 25\%$,这表明本研究构建的发酵动力学模型能准确预测小白杏果酒发酵过程中各项关键指标变化^[30]。

表6 酵母菌活菌数、总糖含量及酒精度的试验值与模型拟合值比较
Table 6 Comparison of the experimental values of viable yeast count, total sugar content and alcohol content with the model fitting values

发酵时间/d	活菌数/($\times 10^7$ CFU $\cdot$ mL $^{-1}$)			酒精度/%vol			总糖含量/(g $\cdot$ L $^{-1}$)		
	试验值	拟合值	误差/%	试验值	拟合值	误差/%	试验值	拟合值	误差/%
0	1.04	1.02	1.96	0.1	0.08	25.00	225.54	225.79	0.11
1	1.48	1.51	1.99	2.9	2.94	1.36	180.39	179.81	0.32
2	4.86	4.84	0.41	8.4	8.32	0.96	92.38	93.19	0.87
3	9.448	9.49	0.44	10.4	10.42	0.19	32.20	31.11	3.50
4	10.59	10.49	0.95	11.0	11.12	1.08	9.75	10.58	7.84
5	10.81	10.59	2.08	11.3	11.41	0.96	6.50	5.69	14.24
6	10.68	10.59	0.85	11.6	11.54	0.52	4.75	4.62	2.81
7	10.43	10.60	1.60	11.7	11.61	0.78	4.02	4.39	8.43
8	10.38	10.60	2.08	11.7	11.65	0.43	3.98	4.34	8.29

3 结论

本研究通过测定和分析小白杏果酒发酵过程中理化指标的动态变化规律,并对其发酵过程关键指标建立动力学模型。结果表明,发酵得到的小白杏果酒活菌数为 10.38×10^7 CFU/mL,酒精度为11.7%vol,总糖含量为3.98 g/L,pH为3.89,可滴定酸含量为8.5 g/L,主要的有机酸为奎宁酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、草酸、柠檬酸和琥珀酸,含量分别为1.29 g/L、0.02 g/L、2.95 g/L、0.91 g/L、0.10 g/L、4.13 g/L和0.32 g/L。发酵得到的小白杏果酒酒体醇厚,具有小白杏独特风味,符合国家发酵酒标准相关要求。相关性分析结果表明,酵母菌活菌数与总糖和苹果酸呈现极显著负相关($P < 0.01$);总糖与酒精呈现高度显著负相关($P < 0.001$),与苹果酸呈现极显著正相关($P < 0.01$);酒精度与酒石酸呈现极显著正相关($P < 0.01$)。发酵动力学分析结果表明,酵母菌活菌数、总糖含量和酒精度的最佳拟合模型分别为DoseResp模型、Boltzmann模型和Logistic模型,相关系数 R^2 分别为0.998 9、0.999 9、0.999 7,模型预测值与试验值误差均 $\leq 25\%$ 。该多尺度动力学模型体系不仅揭示了微生物-底物-产物的动态互作机制,也为精准调控小白杏果酒发酵参数、优化其工业化生产提供理论依据及数值模拟平台。

参考文献:

[1] 马昕彤,秦丽欢,苏米日克孜·开萨尔,等.不同品种杏果实的糖酸组

- 分及含量分析[J]. 新疆农业科学, 2025, 62(3): 669-677.
- [2] 郑惠文, 张秋云, 李文慧, 等. 新疆杏果实发育过程中可溶性糖和有机酸的变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3981-3992.
- [3] 赵多勇, 康露, 王成, 等. 新疆杏子生产现状及存在的问题[J]. 农业工程, 2016, 6(5): 53-56.
- [4] FAN X, ZHAO H, WANG X, et al. Sugar and organic acid composition of apricot and their contribution to sensory quality and consumer satisfaction [J]. *Sci Hortic*, 2017, 225(18): 553-560.
- [5] WU B, GUO Q, WANG G X, et al. Effects of different postharvest treatments on the physiology and quality of 'Xiaobai' apricots at room temperature[J]. *Food Sci Technol*, 2015, 52(4): 2247-2255.
- [6] 娄静文. 小白杏果酒果醋酿造工艺的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [7] 娄静文, 童军茂, 程卫东, 等. 杏子果酒酿造工艺的研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(2): 92-95.
- [8] 宋永宏, 杨晓华, 李静江, 等. 不同杏品种果实营养成分分析及综合评价[J]. 中国农学通报, 2018, 34(23): 65-71.
- [9] SU C, ZHENG X, ZHANG D, et al. Investigation of sugars, organic acids, phenolic compounds, antioxidant activity and the aroma fingerprint of small white apricots grown in Xinjiang[J]. *J Food Sci*, 2020, 85(12): 4300-4311.
- [10] SARANRAJ P, SIVASAKTHIVELAN P, NAVEEN M. Fermentation of fruit wine and its quality analysis: A review[J]. *Aust J Sci Technol*, 2017, 1(2): 85-97.
- [11] 蔡嘉丽. 杏子果酒自然发酵过程中酵母多样性及优良酵母菌株的筛选[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [12] 吴正鹏, 王道科, 王墨阳, 等. 红树莓果汁发酵动力学模型的构建及感官评价[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 209-215.
- [13] 张阳阳, 刘晓媛, 余鸿飞, 等. 红茶菌液猕猴桃果酒发酵动力学模型的建立及抗氧化活性分析[J]. 中国酿造, 2025, 44(3): 223-228.
- [14] 王少曼, 张彦军, 吴刚, 等. 菠萝蜜果酒分批发酵动力学模型研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 74-79.
- [15] 熊亚, 李敏杰, 姜少娟. 芒果酒发酵动力学模型及抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 7, 12, 18-11.
- [16] 周景瑞, 肖敏, 肖荣飞, 等. 红心火龙果酒酿造工艺研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(4): 188-191.
- [17] PU X L, YE P, SUN J, et al. Investigation of dynamic changes in quality of small white apricot wine during fermentation[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2023, 176: 114536.
- [18] 张琪, 朱立斌, 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.
- [19] 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.
- [20] 邓红梅, 柳镜炬, 邓晓琳, 等. 龙眼酒酿造过程中有机酸变化的分析[J]. 食品工业, 2019, 40(7): 69-73.
- [21] 潘立妮, 周家华, 潘雯, 等. 樱桃果酒发酵动力学及抗氧化能力研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 199-204.
- [22] 王玉霞, 李兵, 朱谦丽, 等. 添加不同水果的柑橘果酒酿造与品质分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(2): 124-130.
- [23] 蔡浩成, 刘琪, 高梓怡, 等. 枇杷酒发酵过程中理化及产香特征分析[J]. 食品工业, 2025, 46(5): 97-102.
- [24] CHIDI B S, BAUER F F, ROSSOUW D. Organic acid metabolism and the impact of fermentation practices on wine acidity: A review[J]. *S Afr J Enol Vitic*, 2018, 39(2): 1-15.
- [25] 朱会霞, 孙金旭, 李湘阳. 高效液相色谱法对比分析覆盆子果酒发酵前后有机酸变化[J]. 山东化工, 2019, 48(24): 70-71.
- [26] 郑娇, 俞月丽, 彭强, 等. 不同酵母菌种对发酵海红果酒品质的影响研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(1): 228-236.
- [27] 王博. 不同酵母对蓝莓酒中有机酸的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [28] 曾朝珍, 慕钰文, 袁晶, 等. 发酵方式对苹果草莓酒理化成分和抗氧化活性的影响研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(1): 212-218.
- [29] 祝霞, 王诗, 赵丹丹, 等. 苹果酸-乳酸发酵对美乐低醇桃红葡萄酒香气的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 338-348.
- [30] 吴正鹏, 王道科, 王墨阳, 等. 红树莓果汁发酵动力学模型的构建及感官评价[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 209-215.