

益生菌发酵苹果浊汁贮存期品质分析与货架期预测模型

高振鹏^{1,2} 孟掉琴^{1,2} 王瑜^{1,2} 吴霞^{1,2} 任耀鹏^{1,2} 岳田利^{1,2}

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(杨凌), 陕西杨凌 712100)

摘要: 为明确不同贮存温度对益生菌发酵苹果浊汁品质的影响及预测发酵苹果浊汁的货架期,测定了4、25℃条件下益生菌发酵苹果浊汁色差 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值、 ΔE 值,以及稳定系数、活菌菌体浓度、感官评分、有机酸质量浓度、糖质量浓度和香气成分等指标的变化,基于Arrhenius方程构建了发酵苹果浊汁各项品质指标货架期预测模型。结果表明:在4℃和25℃条件下,发酵苹果浊汁的 b^* 值、 ΔE 值变化符合零级反应,其他指标均符合一级动力学反应。以单指标分别建立预测模型,模型计算验证结果显示,各模型的相对误差均小于10%,偏差度和准确度不大于1.04,说明模型可以很好地预测发酵苹果浊汁贮存期的各项指标。活菌菌体浓度与其他品质指标均呈显著相关,以其建立的4℃和25℃条件下的发酵苹果浊汁货架期预测模型的预测值与实测值的相对误差小于10%,说明模型可靠、合理,可以准确预测益生菌发酵苹果浊汁的货架期。

关键词: 苹果浊汁; 益生菌; 货架期; 预测模型

中图分类号: TS255.44

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)09-0311-08

OSID:



Composition Change and Shelf Life Prediction Model of Probiotic Fermented Cloudy Apple Juice

GAO Zhenpeng^{1,2} MENG Diaojin^{1,2} WANG Yu^{1,2} WU Xia^{1,2} REN Yaopeng^{1,2} YUE Tianli^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products (Yangling), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: As the cloudy apple juice fermented by probiotics is prone to browning, precipitation and decrease in the number of viable bacteria during storage, the quality of cloudy apple juice fermented by probiotics is reduced and the shelf life is difficult to predict. Changes in various indicators during food storage are important factors in controlling product quality. In order to clarify the effect of different temperatures on the quality of fermented cloudy apple juice and predict the shelf life of fermented cloudy apple juice, the L^* value, a^* value, b^* value and ΔE value, suspension stability, viable count, sensory score, organic acid, sugar and aroma components were measured at 4℃ and 25℃. According to Arrhenius equation, various quality index prediction models were constructed. The results showed that the b^* value and ΔE value of the fermented cloudy apple juice were in accordance with the zero-order reaction at 4℃ and 25℃, and other indexes were consistent with the first-order kinetic reaction. The shelf life prediction model was established by single index. The test results showed that the error of each model was less than 10%, the degree of deviation and accuracy was no more than 1.04, which indicated that the model can predict the indexes of the storage period of fermented cloudy apple juice well; the number of viable counts was significantly correlated with other quality indicators. The relative error between the predicted value and the measured value of the shelf life model at 4℃ and 25℃ was less than 10%, which indicated that the model was reliable and reasonable, and can quickly and accurately predict the shelf life of fermented cloudy apple juice.

Key words: cloudy apple juice; probiotics; shelf life; prediction model

收稿日期: 2019-11-01 修回日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400702)和陕西省重点研发计划项目(2020NY-096)

作者简介: 高振鹏(1973—),男,教授,博士,主要从事食品加工及安全控制研究,E-mail: gzp5988@163.com

通信作者: 岳田利(1965—),男,教授,博士,主要从事健康食品制造及安全控制研究,E-mail: ytl6503@163.com

0 引言

苹果浊汁经益生菌发酵后被赋予新的风味,同时可以通过代谢产生抑菌物质,延长苹果浊汁的货架期^[1-3]。但是由于含有活的益生菌,在存放期间益生菌继续增殖及后酸化,使苹果浊汁的品质受到一定影响。要确保苹果浊汁稳定、不褐变、口感好及活菌菌体浓度高,需要准确预测益生菌发酵苹果浊汁的货架期。

食品在贮藏过程中各项指标的变化是控制产品质量的重要因素,这些指标影响食品的货架期。食品货架期指食品理化性质、微生物、风味、感官等品质指标保持最优的时间长度^[4-5]。近年来,动力学模型被广泛应用于食品货架期模型的研究中,Arrhenius 方程是描述食品货架期指标变化反应速率常数与温度的方程,通常被用来构建一些预测模型,以进行食品货架期的预测^[3]。目前,研究者利用动力学模型建立了湿米线、酸奶及双胞蘑菇等产品货架期的预测模型^[6-8]。

目前,尚未见有关益生菌发酵苹果浊汁产品货架期预测模型的研究报道。本文探究不同贮藏温度下益生菌发酵苹果浊汁各项基础理化指标及香气成分的变化,为获得货架期长、营养成分高的发酵苹果浊汁提供理论依据,同时,构建益生菌发酵苹果浊汁货架期预测模型,为发酵苹果浊汁的贮藏和销售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

长富、秦冠苹果,均购自陕西省杨凌示范区市场;嗜酸乳杆菌 6005 (*Lactobacillus acidophilus*)、植物乳杆菌 21805 (*Lactobacillus plants*)、发酵乳杆菌 21828 (*Lactobacillus fermentum*),均保存于西北农林科技大学食品科学与工程学院健康食品制造与安全控制实验室。

MRS 培养基,北京陆桥技术股份有限公司;苹果酸、乳酸、柠檬酸、丙酮酸、琥珀酸、酒石酸,分析纯,纯度 98% 以上,上海源叶生物科技有限公司;蔗糖、果糖、葡萄糖,色谱纯,上海源叶生物科技有限公司;2-辛醇,GC 标准品,日本东京化成工业株式会社。

1.2 仪器与设备

2000JP-1 型离心果汁机,南通金橙机械有限公司;WMC-9005A/T 型 5 L 发酵罐,上海万木春生物工程有限公司;UV-1240 型紫外/可见分光光度计,日本岛津公司;Ci7600 型色度仪,爱色丽(上海)

色彩科技有限公司;LC-15C 型液相色谱仪,日本岛津公司;TRACE1310-ISQLT 型气相色谱质谱联用仪,赛默飞尔科技有限公司。

1.3 方 法

1.3.1 苹果浊汁的制备

在文献[9]制备苹果浊汁工艺的基础上进行 2 500 r/min 离心、20 MPa 均质处理,增加浊汁的稳定性。

1.3.2 发酵培养条件

将种子液(嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌、发酵乳杆菌体积比 1:1:1)^[9]按 10% 接种量接种于装有 2 L 苹果浊汁的发酵罐中,发酵温度为 37℃、发酵时间 24 h,不补料。

1.3.3 指标测定方法

发酵结束后将发酵果汁分装于 100 mL 玻璃瓶,分别置于 4℃ 和 25℃ 下避光贮存,贮藏的样品每隔 7 d 取样,测定各项品质指标,使用 SPSS 20.0 进行数据分析。

(1) 品质指标测定

活菌菌体浓度测定采用倾注平板法^[10](GB 4789.35—2016);感官评定采用 9 点快感标度法^[11]。

稳定系数的测定:在 4 200 r/min 下苹果浊汁被离心 15 min,660 nm 下测定离心后上层液体和离心前果汁的吸光度。采用稳定系数对果汁稳定性进行表征,稳定系数为 660 nm 下果汁离心后与离心前的吸光度比值^[12],这个比值越大,说明离心后果汁中的悬浮物沉降得越少,果汁越稳定。

色泽稳定性的测定采用色差仪法:使用色差仪对仪器背景校准后,测定 L^* 、 a^* 、 b^* ,用 ΔE 表示总色差,表征果汁颜色的变化,计算公式^[13]为

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

式中 L^* ——待测样明暗度(黑白值)

L_0^* ——标准样明暗度(黑白值)

a^* ——待测样红绿值

a_0^* ——标准样红绿值

b^* ——待测样黄蓝值

b_0^* ——标准样黄蓝值

(2) 有机酸含量测定

将发酵苹果浊汁离心取上清液,经 0.45 μm 滤膜过滤上样,对苹果汁中的 7 种有机酸进行定量分析^[14]。

色谱条件:Waters x Terra MS C18 型色谱柱(250 mm \times 4.6 mm,5 μm);流动相:A 相为 100% 甲

醇, B相为 0.01 mol/L $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ (pH 值为 2.7); 梯度洗脱条件: 0~8 min, A相 60%; 8~15 min, A相 100%; 样品进样量 10 μL ; 样品流速 0.7 mL/min; 柱温 30℃。

检测器: 紫外检测器(DAD), 检测波长 210 nm。

(3) 糖含量测定

将发酵苹果浊汁离心后取上清液, 0.45 μm 滤膜过滤后上样, 对发酵苹果浊汁中的葡萄糖、果糖、蔗糖含量进行定量分析^[15]。

色谱条件: 色谱柱为 Sugar-Pak TM I (Waters) 及保护柱; 流动相: 85% 乙腈; 样品进样量 20 μL , 流速 0.6 mL/min, 柱温 80℃; 检测器: 示差折光检测器, 检测池温度 35℃。

(4) 香气成分测定

采用顶空固相微萃取 (Head-space solidphase micro-extraction, HS-SPME) 进行香气成分的富集, 使用气相色谱-质谱 (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 上机测定。在文献[16]色谱条件基础上改进。将 5 mL 样品置于 20 mL 进样瓶中, 分别加入 1.5 g 的 NaCl 和一定量的内标溶液 (2-辛醇), 上机测定。样品在 45℃ 下平衡 30 min, 经老化的萃取头顶空吸附 30 min, 然后进行解析。

色谱条件: DB-5MS 型毛细管色谱柱 (30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 250℃, 载气为 He, 流速为 1.93 mL/min, 不分流进样。程序升温, 初始温度 40℃, 保持 3 min 后以 3℃/min 的速度升温至 120℃, 再以 4℃/min 的速度升温至 160℃, 再以 6℃/min 的速度升温至 240℃, 保持 8 min。

质谱条件: 离子源温度为 230℃, 接口温度为 230℃, 离子化方式 EI, 发射能量 70 eV, 质量扫描范围 35~500 (质荷比)。

采集到的质谱图与 NIST14 library 和 Wiley library 库中的数据匹配, 保留匹配度大于 85% 的物质, 使用内标的浓度乘以挥发物的峰面积与内标峰面积的比率来计算香气成分化合物的含量^[17]。

1.4 货架期模型建立及验证

1.4.1 品质变化反应速率常数确定

利用 Excel 对试验中各项指标随贮存时间变化的数据进行拟合, 根据反应方程, 求出对应的零级和一级反应速率常数 k , 根据决定系数 R^2 , 选择合适的动力学模型^[5, 18-20]。

1.4.2 反应活化能确定

根据 Arrhenius 方程^[21], 方程两边取对数, 作 $\ln k$ 与 $1/T$ 之间的关系曲线 (T 表示贮存温度), 由直线的截距和斜率确定常数 A 和活化能 E_a , 公式为

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

式中 R ——气体常数, 8.314 J/(mol·K)

1.4.3 品质指标预测模型的建立及验证

根据拟合结果, 选择不同的模型方程, 零级反应模型方程为

$$y = y_0 - kt \quad (3)$$

式中 y ——品质指标测试值

y_0 ——品质指标初始测试值

t ——贮存时间, d

一级反应模型方程为

$$\ln y = \ln y_0 + kt \quad (4)$$

结合 Arrhenius 方程, 推导出品质指标预测模型, 零级动力学预测模型为

$$y = y_0 - A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

一级动力学预测模型为

$$y = y_0 \exp\left(A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) t\right) \quad (6)$$

通过计算模型相对误差、偏差度 B_f 和准确度 A_f 对模型拟合度进行评价^[22]。

1.4.4 货架期预测模型的建立

将活菌菌体浓度动力学预测模型变形, 得到货架期与活菌菌体浓度的关系方程, 即不同贮存温度下的货架期预测模型^[23], 方程表达式为

$$S = \frac{F_t}{A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (7)$$

式中 S ——货架期, d

F_t ——货架期结束时品质指标测试值

2 结果与讨论

2.1 不同温度贮存过程中各项指标的变化

2.1.1 活菌菌体浓度

不同贮存温度下色差变化值 ΔE 、稳定系数、活菌菌体浓度及感官评分变化如表 1 所示。

由表 1 可知, 4℃ 贮存条件下各项指标均有显著差异, 色差变化值 ΔE 在贮存期间逐渐增加, 稳定系数降低, 活菌菌体浓度和感官评分也随着贮存时间延长而呈下降趋势。

贮存过程中发酵苹果浊汁 ΔE 一直在增加, 当 $\Delta E \geq 2$ 时, 果汁颜色发生肉眼可见的变化。在 4℃、28 d 和 25℃、21 d 时, ΔE 大于 2, 此时发酵苹果浊汁颜色发生了明显改变。这与文献[24]的红肉苹果浊汁冷藏条件下色泽的变化趋势相一致。此外, 4℃ 条件下稳定系数下降趋势较小, 28 d 时稳定系数达

表1 不同贮存温度下品质指标
Tab.1 Quality indicators at different storage temperatures

品质指标	温度/ °C	贮存时间/d				
		0	7	14	21	28
ΔE	4		(0.74 ± 0.17) ^c	(0.75 ± 0.23) ^c	(1.23 ± 0.13) ^b	(2.05 ± 0.34) ^a
	25		(1.13 ± 0.14) ^a	(1.55 ± 0.18) ^b	(2.13 ± 0.03) ^c	(3.36 ± 0.32) ^d
稳定系数	4	(0.43 ± 0.01) ^a	(0.41 ± 0.01) ^b	(0.33 ± 0.01) ^c	(0.28 ± 0.01) ^d	(0.26 ± 0.01) ^e
	25	(0.43 ± 0.01) ^a	(0.34 ± 0.01) ^b	(0.22 ± 0.01) ^c	(0.21 ± 0.01) ^c	(0.18 ± 0.01) ^d
活菌菌体浓度/ (CFU·mL ⁻¹)	4	(5.70 ± 0.55) × 10 ^{8a}	(4.89 ± 0.71) × 10 ^{8b}	(4.21 ± 0.38) × 10 ^{8c}	(2.43 ± 0.66) × 10 ^{8d}	(1.96 ± 0.03) × 10 ^{8e}
	25	(5.70 ± 0.55) × 10 ^{8a}	(4.65 ± 0.50) × 10 ^{8b}	(3.45 ± 0.15) × 10 ^{8c}	(1.77 ± 0.20) × 10 ^{8d}	(7.80 ± 0.71) × 10 ^{7e}
感官评分	4	(44.00 ± 0.84) ^a	(41.00 ± 0.82) ^b	(39.00 ± 0.52) ^b	(35.00 ± 1.26) ^c	(31.00 ± 1.10) ^d
	25	(44.00 ± 0.84) ^a	(39.00 ± 1.52) ^b	(31.00 ± 1.29) ^c	(28.00 ± 1.65) ^d	(27.00 ± 1.56) ^e

注:同一行不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

0.26,变化明显比25℃时小,说明温度对稳定系数的影响显著($p < 0.05$)。

25℃、28 d的贮存条件下,发酵苹果浊汁中活菌菌体浓度仍能达到 7.80×10^7 CFU/mL,远高于轻工行业标准规定的大于 10^5 CFU/mL的标准。随着发酵结束,发酵苹果浊汁中乳酸菌已进入衰亡期,乳酸菌细胞壁处于低pH值环境,需要更多的能量来维持细胞内的pH值,导致ATP减少,从而乳酸菌因细胞壁破坏而死亡,活菌菌体浓度下降^[25]。感官评分是产品贮存期的关键指标,得分高低直接影响其外观品质和口感接受度^[26-27],由表1可知,发酵苹果浊汁感官评分值不断下降,且贮藏温度越高,下降越快。0~7 d期间,温度对发酵苹果浊汁的感官评分无显著影响($p > 0.05$),7 d后25℃条件下感官评分下降较快。低温减缓了发酵苹果浊汁的褐变,避免了一些不良反应的发生,4℃、28 d发酵苹果浊汁发酵气息变浓,苹果果香味变淡,较大程度突出了果汁发酵的良好口感和色泽。

2.1.2 香气成分

对4℃和25℃贮存条件下发酵苹果浊汁的香气成分进行检测,经质谱分析图谱比对分析后,相似度大于85%的共29种香气成分,其中醇类6种,酯类9种,醛酮类6种,酸类3种,其他类5种。研究贮存期间发酵苹果浊汁香气成分的变化,绘制不同温度下香气物质总质量浓度柱状图,如图1所示。

由图1可知,在0~14 d,发酵苹果浊汁中醇类和酸类物质总质量浓度在增加,14~28 d期间下降;总酯和总醛酮质量浓度随着贮存时间增加而减少,4℃时下降程度小于25℃,可能由于25℃温度过高,造成香气物质逸散,从而质量浓度降低,其他类物质总质量浓度变化不显著。因此,发酵苹果浊汁在低温下贮藏,既能保持苹果浊汁鲜爽的风味,减少香气逸散,保留大部分香气成分,又能通过低温降低果汁发酵产生的轻微涩感和刺喉

感,使风味更为柔和。

2.1.3 有机酸、糖质量浓度

结合上述结果,本试验测定了4℃条件下发酵苹果浊汁贮存期间的有机酸、糖质量浓度变化,结果如表2所示。

由表2可知,4℃贮存期间发酵苹果浊汁中葡萄糖及果糖含量增加,蔗糖含量下降。4℃条件下,0~21 d期间发酵苹果浊汁中草酸质量浓度从0.33 mg/mL增加到0.39 mg/mL,21 d后不再增加;丙酮酸含量先下降后上升;0~14 d期间乙酸含量增加,14~28 d期间乙酸含量不变。0~7 d期间苹果酸含量下降,主要是乳酸菌在发酵过程中利用苹果酸进行三羧酸循环等生化反应,产生其他酸^[28],从而导致苹果酸含量降低。贮存期间由于乳酸菌的生长消耗糖类物质,产生有机酸,导致有机酸总量增加。

2.2 品质指标预测模型的建立及验证

2.2.1 品质指标预测模型的建立

对 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、稳定系数、活菌菌体浓度和感官评分随贮存时间变化的数据进行拟合,得到拟合曲线,求出相应的零级和一级反应速率常数 k 及决定系数 R^2 ,结果如表3所示。

由表3可知, b^* 零级动力学模型的决定系数大于一级动力学模型, L^* 、 a^* 、活菌菌体浓度、稳定系数和感官评分一级动力学模型的决定系数大于零级动力学模型,因此 b^* 和 ΔE 选用零级动力学模型,其他指标选用一级动力学模型。

结合Arrhenius方程,作 $\ln k$ 与 $1/(1000T)$ 之间的关系曲线,如图2所示。

根据曲线斜率和截距计算得到 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、稳定系数、活菌菌体浓度、感官评分的活化能 E_a 分别为 1.49×10^5 、 1.87×10^4 、 1.84×10^4 、 1.65×10^4 、 1.19×10^4 、 2.05×10^4 、 7.9×10^3 J/mol, A 分别为 1.26×10^6 、111.85、1 525.22、563.52、24.77、2 518.45、2.89。

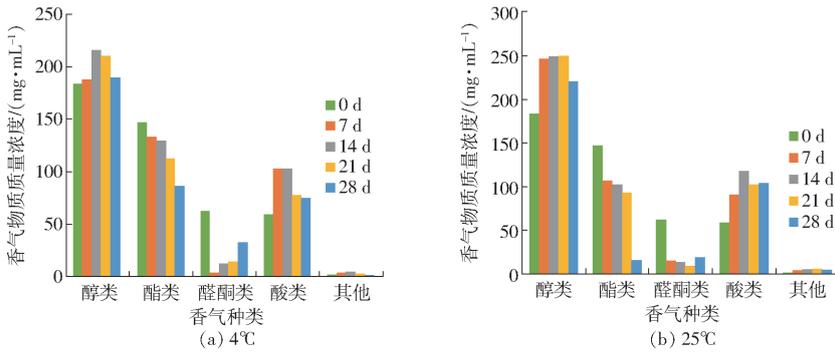


图 1 不同温度贮存下香气物质总质量浓度

Fig. 1 Histogram of total concentration change of aroma species at different storage temperatures

表 2 4°C 下贮存期间有机酸、糖质量浓度变化

Tab. 2 Changes in organic acid and sugar content during storage at 4°C

时间/ d	有机酸							糖		
	草酸	丙酮酸	苹果酸	乙酸	乳酸	柠檬酸	琥珀酸	果糖	葡萄糖	蔗糖
0	0.33 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.29 ± 0.02	61.07 ± 1.17	37.65 ± 0.15	23.45 ± 0.06
7	0.37 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.17 ± 0.02	0.35 ± 0.01	61.57 ± 0.58	38.79 ± 0.24	21.24 ± 0.12
14	0.38 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.14 ± 0.03	0.34 ± 0.03	62.45 ± 0.34	39.43 ± 0.37	21.17 ± 0.65
21	0.39 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02	0.19 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.13 ± 0.07	0.32 ± 0.06	62.75 ± 0.23	40.02 ± 0.21	19.37 ± 2.10
28	0.39 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.38 ± 0.02	63.28 ± 0.16	40.51 ± 0.03	17.78 ± 0.69

表 3 理化品质在不同贮存温度下的动力学模型参数

Tab. 3 Parameters of kinetic models of quality at different storage temperatures

品质 指标	温度/ °C	零级		一级	
		<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>R</i> ²
<i>L</i> [*]	4	0.381	0.787 8	0.009 7	0.855 3
	25	0.016	0.693 0	0.927 0	0.930 0
$\sum R^2$			1.480 8		1.785 3
<i>a</i> [*]	4	0.119	0.920 0	0.033 0	0.926 8
	25	0.226	0.977 0	0.058 5	0.979 8
$\sum R^2$			1.897 0		1.906 6
<i>b</i> [*]	4	0.524	0.852 5	0.027 5	0.846 3
	25	0.919	0.814 6	0.050 7	0.805 7
$\sum R^2$			1.667 1		1.652 0
ΔE	4	0.439 4	0.857 5		
	25	0.727 4	0.936 9		
$\sum R^2$			1.794 4		
稳定系数	4	0.047 2	0.917 4	0.144 2	0.941 9
	25	0.051 3	0.842 0	0.207 2	0.894 2
$\sum R^2$			1.759 4		1.836 1
活菌菌体浓度	4	1.057	0.948 8	0.320 2	0.950 8
	25	1.329	0.962 7	0.602 3	0.991 1
$\sum R^2$			1.911 5		1.941 9
感官评分	4	3.4	0.969 8	0.094 7	0.979 7
	25	3.9	0.856 9	0.120 5	0.884 0
$\sum R^2$			1.826 7		1.863 7

将 E_a 和 A 代入式 (5) 和式 (6) 中, 得到各品质指标预测模型。

L^* 预测模型方程

$$L^* = L_0^* \exp \left(1.26 \times 10^6 \exp \left(\frac{-17\,942}{T} \right) t \right) \quad (8)$$

a^* 预测模型方程

$$a^* = a_0^* \exp \left(111.85 \exp \left(\frac{-2\,252.8}{T} \right) t \right) \quad (9)$$

b^* 预测模型方程

$$b^* = b_0^* - 1\,525.22 \exp \left(\frac{-2\,210.6}{T} \right) \quad (10)$$

ΔE 预测模型方程

$$\Delta E = \Delta E_0 - 563.52 \exp \left(\frac{-1\,983.4}{T} \right) \quad (11)$$

稳定系数 Q 预测模型方程

$$Q = Q_0 \exp \left(24.77 \exp \left(\frac{-1\,426.3}{T} \right) t \right) \quad (12)$$

活菌菌体浓度 V 预测模型方程

$$V = V_0 \exp \left(2\,518.45 \exp \left(\frac{-2\,468.1}{T} \right) t \right) \quad (13)$$

感官评分 W 预测模型方程

$$W = W_0 \exp \left(2.89 \exp \left(\frac{-948.1}{T} \right) t \right) \quad (14)$$

2.2.2 品质指标预测模型验证

利用各品质指标预测模型方程计算验证组的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、活菌菌体浓度、稳定系数和感官评分预测值, 与实测值以 1:1 绘制二者相关性曲线。对模型预测值和实测值的相对误差、偏差度和准确度进行计算, 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 各品质指标预测值与实测值的二者相关性曲线决定系数 R^2 均较高, 说明预测值与实测值极相关。建立的各品质指标预测模型相对误差均在 10% 以内, 偏差度和准确度均不大于 1.04, 均在可接受范围内, 表明所建模型能够快速准确预测

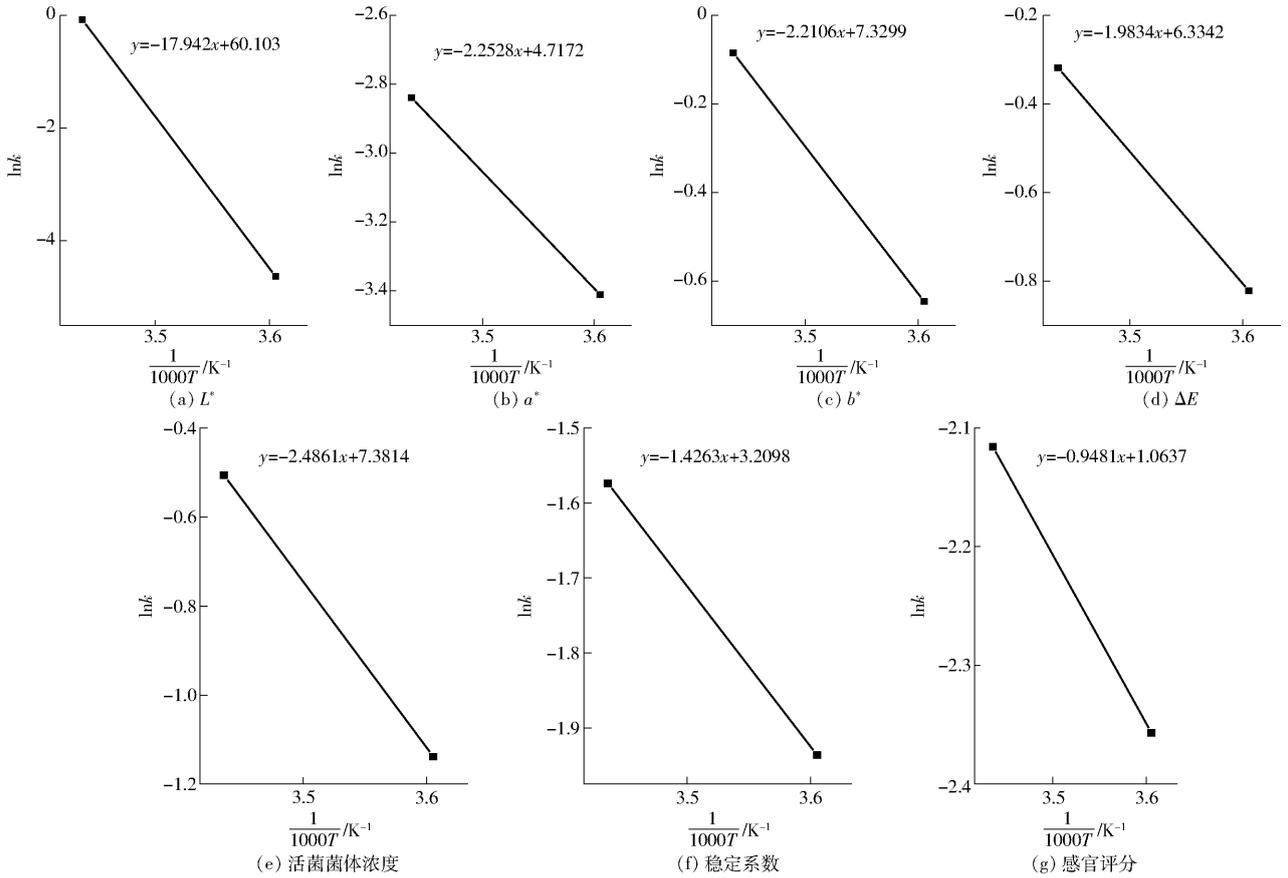


图2 4℃与25℃条件下不同品质指标的 Arrhenius 曲线

Fig. 2 Arrhenius curves of different quality indicators at 4℃ and 25℃

表4 不同品质指标预测模型的预测值与实测值

Tab. 4 Predicted and measured values of different quality indicators prediction models

品质指标	预测值与实测值 1:1的线性方程式	决定系数 R^2	相对误差/%	偏差度 B_f	准确度 A_f
L^*	$y = 1.2531x - 10.338$	0.9696	<10	1.00	1.02
a^*	$y = 1.0721x - 0.3069$	0.9601	<10	1.00	1.00
b^*	$y = 0.7305x + 5.4034$	0.9344	<10	0.99	1.01
ΔE	$y = 0.9315x + 0.0171$	0.9914	<10	1.02	1.04
稳定系数	$y = 1.0419x - 0.0297$	0.9971	<10	1.04	1.03
活菌体浓度	$y = 0.9732x + 0.0367$	0.9986	<10	1.01	1.02
感官评分	$y = 0.9519x + 0.0269$	0.9736	<10	1.01	1.01

4℃与25℃贮藏条件下发酵苹果浊汁的 L^* 、 a^* 、 b^* 、活菌体浓度、稳定系数和感官评分。

2.2.3 货架期预测模型的建立与验证

活菌是发酵制品的重要观测指标,活菌数量决

定产品的寿命长短,也决定其营养价值,因此以活菌作为发酵苹果浊汁货架期预测指标,使用 SPSS 20.0 分析活菌与其他品质指标的相关性,用皮尔逊相关系数表示,结果如表5所示。

表5 活菌菌体浓度与其他指标的皮尔逊相关系数

Tab. 5 Person correlation coefficient among various indicators and viable counts

温度/℃	L^*	a^*	b^*	ΔE	稳定系数	感官评分
4	0.980**	-0.967**	0.932**	-0.980**	0.950**	0.967**
25	0.913**	-0.952**	0.982**	-0.917**	0.994**	0.942**

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

由表5可知,发酵苹果浊汁中活菌与其他指标均显著相关,其中与 a^* 和 ΔE 显著负相关,说明活

菌可以作为发酵苹果浊汁的货架期模型预测指标。根据活菌动力学预测模型,得到发酵苹果浊汁

货架期与活菌的关系方程

$$S = \frac{\ln V_t - \ln V_0}{2518.45 \exp\left(\frac{-2468.1}{T}\right)} \quad (15)$$

式中 V_t ——货架期结束时活菌菌体浓度

对获得的发酵苹果浊汁货架期模型进行验证, 根据模型方程计算 4℃ 和 25℃ 下活菌菌体浓度的货架期预测值, 然后与实测值进行比较, 如表 6 所示。

表 6 不同温度下发酵苹果浊汁的货架期预测值与实测值

Tab. 6 Predicted and observed shelf life of cloudy apple juice at different storage temperatures

贮藏温度/ ℃	货架期预测 值/d	货架期实测 值/d	相对误差/ %
4	21.76	21	3.49
25	14.43	14	2.98

由表 6 可知, 在 4、25℃ 条件下发酵苹果浊汁货架期预测值与实测值相对误差分别为 3.49% 和 2.98%, 均小于 10%, 说明建立的发酵苹果浊汁活菌菌体浓度货架期预测模型可以很好地预测发酵苹果浊汁在 4~25℃ 的货架期。

3 结论

(1) 在 4℃ 和 25℃ 贮存条件下, 贮存 28 d 后发酵苹果浊汁的色泽和稳定系数下降, 活菌菌体浓度仍能达到 7.80×10^7 CFU/mL, 远高于轻工行业标准; 在发酵苹果浊汁贮存过程中, 共检测到 29 种香气成分, 其中醇类 6 种、酯类 9 种、醛酮类 6 种、酸类 3 种, 其他类 5 种; 贮存期间, 酯类总量降低, 醛酮总量降低, 酸类含量先增加、后减少。

(2) 基于 Arrhenius 方程, 建立了发酵苹果浊汁 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、稳定系数、活菌菌体浓度和感官评分的预测模型方程。经验证, 发酵苹果浊汁模型预测值与实测值相对误差均小于 10%, 偏差度和准确度不大于 1.04, 说明模型可以很好地预测发酵苹果浊汁贮存期的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、活菌菌体浓度、稳定系数和感官评分等指标。

(3) 在发酵苹果浊汁贮藏过程中, 活菌菌体浓度与其他品质指标均呈显著相关, 以其建立的 4、25℃ 条件下的发酵苹果浊汁货架期模型预测值与实测值的相对误差小于 10%, 说明模型可靠、合理, 可以准确预测发酵苹果浊汁的货架期。

参 考 文 献

- [1] DI CAGNO R, FILANNINO P, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 248:56–62.
- [2] GUERGOLETTO K B, WOSIACKI G, GRANATO D. Probiotic beverage from apple fermented with *Lactobacillus casei*: development and sensory profile[J]. Engineering in Life Sciences, 2012, 12(4):1–11.
- [3] NEMATOLLAHI A, SOHRABVANDI S, MORTAZAVIAN A, et al. Viability of probiotic bacteria and some chemical and sensory characteristics in cornelian cherry juice during cold storage[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2016, 21:49–53.
- [4] WEI J P, ZHANG Y X, YUAN Y H, et al. Characteristic fruit wine production via reciprocal selection of juice and non-*Saccharomyces* species[J]. Food Microbiology, 2019, 79:66–74.
- [5] 王冉冉. 鲜切紫甘蓝冷链品质变化及其货架期预测模型构建[D]. 成都:西华大学, 2018.
WANG Ranran. Quality changes and predictive modeling of the shelf-life of fresh-cut red cabbage in the cold-chain[D]. Chengdu: Xihua University, 2018. (in Chinese)
- [6] 胡云峰, 王晓彬, 张利苹. 不同贮藏温度下鲜湿米线的品质变化动力学模型及其货架期预测[J]. 现代食品科技, 2019, 35(1):89–96.
HU Yunfeng, WANG Xiaobin, ZHANG Liping. Dynamic model of quality change of fresh rice noodle in different temperatures and the prediction of its shelf life[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(1):89–96. (in Chinese)
- [7] 蔡超. 酸奶在贮存期间参数的变化和对货架寿命预测模型的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
CAI Chao. Prediction model of shelf life of yoghurt to various parameters during storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [8] 刘国花. 双孢蘑菇采收后品质变化及货架期预测模型研究[D]. 天津:天津科技大学, 2015.
LIU Guohua. Studies on changes of quality and prediction models for shelf-life of postharvest *Agaricus bisporus*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 孟掉琴, 吴霞, 岳田利, 等. 混菌发酵苹果浊汁的益生菌筛选及其发酵动力学模型构建[J]. 食品科学, 2019, 40(12):153–159.
MENG Diaoqin, WU Xia, YUE Tianli, et al. Screening of probiotics for mixed culture fermentation of cloudy apple juice and construction of kinetic models[J]. Food Science, 2019, 40(12):153–159. (in Chinese)
- [10] 国家食品药品监督管理总局. 食品微生物学检验乳酸菌检验: GB 4789.35—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] VERON H E, DI RISIO H D, ISLA M I, et al. Isolation and selection of potential probiotic lactic acid bacteria from *Opuntia ficus-indica*, fruits that grow in Northwest Argentina[J]. LWT—Food Science and Technology, 2017, 84:231–240.

- [12] 黄筱静. 影响苹果浊汁品质关键因素的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
HUANG Xiaojing. Study on the critical factors for quality of cloudy apple juice[D]. Beijing:China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [13] ILLERA A E, SANZ M T, BENITO-ROMAN O, et al. Effect of thermosonication batch treatment on enzyme inactivation kinetics and other quality parameters of cloudy apple juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 71 – 80.
- [14] 叶萌祺. 苹果酒酿造过程香气物质调控及 FT-NIRS 分析方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
YE Mengqi. The regulation of cider aroma compounds and the determination based on Fourier transform near infrared spectroscopy[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [15] 李维妮, 张宇翔, 魏建平, 等. 益生菌发酵苹果汁工艺优化及有机酸的变化[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 80 – 87.
LI Weini, ZHANG Yuxiang, WEI Jianping, et al. Optimization of fermentation of apple juice by probiotics and organic acids evolution during fermentation[J]. Food Science, 2017, 38(22): 80 – 87. (in Chinese)
- [16] 李维妮, 郭春锋, 张宇翔, 等. 气相色谱-质谱法分析乳酸菌发酵苹果汁香气成分[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 146 – 154.
LI Weini, GUO Chunfeng, ZHANG Yuxiang, et al. GC-MS analysis of aroma components of apple juice fermented with lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2017, 38(4): 146 – 154. (in Chinese)
- [17] 吕春茂, 刘畅, 孟宪军, 等. 苹果渣发酵过程中游离氨基酸和挥发性香气成分分析[J]. 食品科学, 2014, 35(18):146 – 150.
LÜ Chunmao, LIU Chang, MENG Xianjun, et al. Analysis of free amino acids and aroma aomponents in fermented apple pomace[J]. Food Science, 2014, 35(18):146 – 150. (in Chinese)
- [18] 张新林, 谢晶, 钱韻芳, 等. 不同温度条件下三文鱼中荧光假单胞菌生长预测模型的建立[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 74 – 79.
ZHANG Xinlin, XIE Jing, QIAN Yunfang, et al. Predictive growth model for *Pseudomonas fluorescence* in salmon at different temperatures[J]. Food Science, 2017, 38(21): 74 – 79. (in Chinese)
- [19] 崔跃慧, 范海潇, 王甜, 等. 不同贮藏温度下调理猪肉饼货架期预测模型的建立[J]. 核农学报, 2018, 32(12):2355 – 2362.
CUI Yuehui, FAN Haixiao, WANG Tian, et al. Prediction model of the shelf-life of ready-to-eat pork patties at different storage temperature[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(12):2355 – 2362. (in Chinese)
- [20] OSZMIAŃSKI J, WOJDYŁO A, KOLNIAK J. Effect of enzymatic mash treatment and storage on phenolic composition, antioxidant activity, and turbidity of cloudy apple juice[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(15):7078 – 7085.
- [21] CORBO M R, BEVILACQUA A, PETRUZZI L, et al. Functional beverages; the emerging side of functional foods commercial trends, research, and health implications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(6): 1192 – 1206.
- [22] 雷会宁, 魏益民, 魏帅, 等. 冷却猪肉货架期预测模型建立及验证[J]. 中国食品学报, 2018, 18(10):188 – 191.
LEI Huining, WEI Yimin, WEI Shuai, et al. Establishment and verification of shelf life prediction model for chilled pork[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(10):188 – 191. (in Chinese)
- [23] 胡位歆, 丁甜, 刘东红. 草莓采后货架期预测模型的构建[J]. 中国食品学报, 2017, 17(3):186 – 193.
HU Weixin, DING Tian, LIU Donghong. Building shelf-life prediction models of postharvest strawberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(3):186 – 193. (in Chinese)
- [24] 曹美霞. 红肉苹果浊汁加工贮藏研究及工艺设计[D]. 西安:陕西师范大学, 2016.
- [25] 李印. 乳酸菌发酵果蔬汁在加工和贮藏过程的品质变化与控制[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
LI Yin. Changes and control on quality of lactic acid bacteria fermented fruit and vegetable juice during processing and storage [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] XU X X, BAO Y J, WU B B, et al. Chemical analysis and flavor properties of blended orange, carrot, apple and Chinese jujube juice fermented by selenium-enriched probiotics[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 250 – 258.
- [27] BUJNA E, FARKAS N A, TRAN A M, et al. Lactic acid fermentation of apricot juice by mono and mixed cultures of probiotic *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains[J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27(2):547 – 554.
- [28] CHEN C, LU Y Q, YU H Y, et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice [J]. Food Bioscience, 2019, 27:30 – 36.