

南果梨果汁非酶促褐变反应机制研究

那广宁¹, 丁昊¹, 唐霜¹, 张祥云¹, 张锐^{2*}

(1. 沈阳工学院 生命工程学院, 辽宁 抚顺 113122; 2. 辽宁省农业科学院 食品与加工研究所, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 通过监测南果梨果汁在不同温度贮藏过程中非酶促褐变反应的褐变指数(browning index, BI)及 5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)、总酚、抗坏血酸、游离氨基酸、还原糖的含量, 探究其非酶促褐变反应的主要反应机制和影响因素。通过动力学方程表达各反应进行的情况和主次关系, 结果表明, 南果梨果汁非酶促褐变的主要反应机制是美拉德反应和抗坏血酸氧化分解反应, 多元酚氧化缩合反应和焦糖化反应在南果梨果汁非酶促褐变反应体系中影响较小。在不同的贮藏温度下, 5-HMF 和抗坏血酸的含量变化规律均符合零级反应动力学模型, 随着贮藏温度的升高, 南果梨果汁的非酶促褐变反应速度加快。

关键词: 南果梨; 果汁; 褐变指数; 非酶促褐变; 动力学模型

Influencing Factors of Non-enzymatic Browning of Nanguo Pear Juice

NA Guang-ning¹, DING Hao¹, TANG Shuang¹, ZHANG Xiang-yun¹, ZHANG Rui^{2*}

(1. College of Life Engineering, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, Liaoning, China; 2. Food and Processing Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, Liaoning, China)

Abstract: The browning index, 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) content, total phenol content, ascorbic acid content, free amino acid content, and reducing sugar content of Nanguo pear juice were determined during storage at different temperatures. The kinetic equation was fitted to reflect the status of each index so as to reveal the main mechanism and influencing factors of non-enzymatic browning. The results showed that the non-enzymatic browning of Nanguo pear juice were mainly caused by Maillard reaction and oxidative decomposition of ascorbic acid, while the oxidative condensation of polyphenol and caramelization had little effect on the browning. The changes in 5-HMF content and ascorbic acid content of the juice stored at different temperatures can be fitted with the zero-order reaction kinetics model. The non-enzymatic browning of Nanguo pear juice was accelerated with the increase in storage temperature.

Key words: Nanguo pear; juice; browning index; non-enzymatic browning; kinetic model

引文格式:

那广宁, 丁昊, 唐霜, 等. 南果梨果汁非酶促褐变反应机制研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 23-30.

NA Guangning, DING Hao, TANG Shuang, et al. Influencing Factors of Non-enzymatic Browning of Nanguo Pear Juice[J]. Food Research and Development, 2022, 43(21): 23-30.

南果梨为蔷薇科梨属秋子梨, 主要产于辽宁省南部地区, 鞍山市和辽阳市尤为闻名。南果梨以其色泽

鲜艳、爽口多汁、果香浓郁的特点驰名中外, 果实富含钙、镁、锌等 37 种矿物质元素, 具有解酒护肝、美容养

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目(2019-MS-241)

作者简介: 那广宁(1984—), 男(满), 副教授, 博士, 研究方向: 农产品深加工与利用。

* 通信作者: 张锐(1981—), 男(汉), 副研究员, 硕士, 研究方向: 农产品贮藏加工。

颜的功效。此外,南果梨中含有多种微量元素、维生素、氨基酸和黄酮类物质,具有较高的营养价值^[1-3]。在国内,南果梨以鲜果销售为主,目前关于南果梨的研究方向主要集中在保鲜技术、活性成分提取和栽培技术方面,对果汁、果干和蜜饯等深加工产品的研究较少。南果梨果汁加工及保藏技术的研究对南果梨产业发展具有促进作用,为解决南果梨鲜果腐败引起的资源浪费问题提供了思路,对提高农产品附加值和地域特色农产品的推广具有重要意义。在不同温度(5、25、35℃)的贮藏条件下,定时监测褐变指数及抗坏血酸、氨基酸、还原糖和5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural,5-HMF)含量的变化趋势^[4],并根据反应动力学的指数结果探究南果梨果汁非酶促褐变反应的影响因素。研究所得结果为提高南果梨果汁的色泽稳定性提出解决思路。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

南果梨(完熟新鲜无霉烂):市售;抗坏血酸、2,6-二氯酚、亚硫酸氢钠、亚硫酸钠、乙酸锌、亚铁氰化钾、草酸、盐酸、硫酸铜、亚甲基蓝、酒石酸钾钠、氢氧化钾、冰乙酸、茚三酮、邻苯二酚(均为分析纯)、磷酸盐缓冲液(pH7.3):国药集团化学试剂有限公司;果胶酶(5×10^4 U/g)、纤维素酶(1.1×10^4 U/g):河南万邦实业有限公司;福林酚试剂盒:北京索莱宝生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

食物调理机(FP3010):德国博朗公司;高速离心机(TDZ5-WS):湖南湘仪仪器有限公司;高压灭菌锅(LHS-12C):上海力辰邦西仪器科技有限公司;紫外分光光度计(752G):上海仪电分析仪器有限公司;恒温培养箱(DHP-9012):上海一恒科学仪器有限公司;自动电位滴定仪(ZD-2):上海雷磁仪器设备有限公司;磁力搅拌器(MSJ-E):上海科兴仪器有限公司。

1.3 南果梨果汁的制备

1.3.1 南果梨的预处理

参考刘苏苏^[5]的方法,选择完熟、无虫眼且无霉烂的新鲜南果梨,洗净并沥干水分,去核后将果肉用小刀切成长宽均为3 cm的小块。将南果梨转移到烧杯中并加入相同质量的蒸馏水,再将烧杯放入水浴锅80℃灭酶处理,保温30 min^[6-7]。

1.3.2 打浆与酶解

将果肉小块捞出沥干,冷却至常温后,转入榨汁机中,1 500 r/min搅打1 min,再转移至烧杯中加入质量

分数0.05%果胶酶和0.05%纤维素酶处理30 min,处理后放入冰箱预冷至5℃。

1.3.3 粗过滤与离心

将经过酶解后的果浆以200目滤网过滤3次,在5℃、8 000 r/min的条件下离心10 min。离心后留上层清液。

1.3.4 包装与杀菌

将南果梨果汁罐装到玻璃密封容器中,灌装时留出5%的上层罐顶空间防止胀罐。包装后的南果梨果汁用高压灭菌锅在121℃的条件下灭菌15 min。

1.4 标准曲线的绘制

1.4.1 亮氨酸标准曲线的绘制

取10只洁净具塞试管,分别加入10 mg/mL亮氨酸标准溶液(0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.00、1.10、1.20、1.30 mL)和蒸馏水(9.60、9.50、9.40、9.30、9.20、9.00、8.90、8.80、8.70 mL),按浓度梯度配制氨基酸标准溶液。再向各试管中加入0.5 mL的茚三酮显色剂和0.5 mL pH7.3的磷酸盐缓冲液,盖上试管塞置于100℃水浴加热15 min,冷却后在565 nm处测定吸光值,根据数据绘制标准曲线^[8-14]。该标准曲线拟合方程为 $y=0.8943x-0.2112$, $R^2=0.9903$ 。

1.4.2 总酚标准曲线的绘制

精确称取没食子酸标准品50.0 mg,用水溶解后定容于500 mL容量瓶中,得到0.1 mg/mL没食子酸标准溶液。取8支25 mL具塞试管分别编号并移取没食子酸标准溶液(5.00、7.50、10.00、12.50、15.00、17.50、20.00、22.50 mL)和福林酚试剂1.00 mL,摇匀后再分别加入10% Na_2CO_3 溶液1.50 mL,加蒸馏水定容至25 mL。避光反应2 h后在760 nm处测定吸光值,并绘制标准曲线。该标准曲线拟合方程为 $y=0.2159x-0.3780$, $R^2=0.9917$ 。

1.4.3 总糖标准曲线绘制

取6支10 mL具塞比色管分别移取0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL 0.9984 g/L葡萄糖标准液,分别补蒸馏水至2.0 mL。以2.0 mL蒸馏水作空白对照,分别精密加入6%苯酚1.0 mL,摇匀后立即加入浓硫酸5.0 mL,摇匀,置于70℃水浴中加热20 min后冷却10 min,于490 nm处测吸光值,绘制标准曲线。该标准曲线拟合方程为 $y=17.1140x-0.0243$, $R^2=0.9952$ 。

1.5 南果梨果汁贮藏试验

将南果梨果汁分别置于低温(5℃)、室温(25℃)和高温(35℃)环境下贮藏40 d,每隔5 d测量1次5-HMF、褐变指数、抗坏血酸含量、游离氨基酸和总酚含量等相关指标。

1.5.1 5-HMF 的测定

取贮藏试验的南果梨果汁样品 5 mL, 用 30 mL 蒸馏水稀释后转移至 50 mL 容量瓶, 加入 0.5 mL 澄清剂 I (5% 亚铁氰化钾溶液), 摇匀后再加入澄清剂 II (2.5% 乙酸锌溶液), 再次摇匀后用蒸馏水定容至刻度。以 5 000 r/min 离心 15 min, 吸取上层清液各 5 mL 于两个比色管中分别编号为 1 号和 2 号, 其中 1 号比色管为参比液, 2 号比色管为待测液。在 1 号比色管中加入 5 mL 0.02 g/100 mL NaHSO₃ 溶液, 混匀, 向 2 号比色管中加入 5 mL 蒸馏水。分别用石英比色皿于 284 nm 和 336 nm 处测定 1 号比色管和 2 号比色管的吸光值, 记录为 $A_{284\text{ nm}}$ 和 $A_{336\text{ nm}}$ ^[15-17]。5-HMF 含量的计算公式如下。

$$H = \frac{(A_{284\text{ nm}} - A_{336\text{ nm}}) \times V_1 \times 14.97}{V_2}$$

式中: H 为贮藏试验中南果梨果汁样品中 5-HMF 的含量, mg/mL; V_1 为果汁样品的体积, mL; V_2 为待测液的体积, mL; 14.97 为换算系数。

1.5.2 褐变指数(browning index, BI)的测定

取两只比色管分别编号为 1 号和 2 号, 其中 1 号比色管为待测液, 2 号比色管为参比液。取适量贮藏试验中的样品以 5 000 r/min 离心 15 min, 吸取离心管中的上层清液于 1 号比色管中, 并向 2 号比色管加入适量蒸馏水, 分别测定其在 420 nm 处的吸光值。褐变指数的计算公式如下^[18-20]。

$$\text{褐变指数} = A_1 - A_0$$

式中: A_1 为待测液在 420 nm 处的吸光值; A_0 为参比液在 420 nm 处的吸光值。

1.5.3 抗坏血酸含量的测定

采用电位滴定法测量抗坏血酸的含量^[21-22]。吸取样液(南果梨果汁) 5.0 mL, 称重后加入到 50 mL 容量瓶中, 加入 5 g/mL 草酸溶液并定容至刻度, 过滤后得到待测液。再吸取 20 mL 待测液至小烧杯, 接入磁力搅拌器。将电位滴定仪的电极插入体系中, 打开电位记录仪和电磁搅拌器, 将 2,6-二氯靛酚滴入反应体系中, 观察电位记录仪数值达到最高点时的 2,6-二氯靛酚消耗的毫升数。抗坏血酸含量的计算公式如下。

$$\text{抗坏血酸含量} / (\text{mg/mL}) = \frac{V_1 \times T}{V_2} \times \frac{V}{m}$$

式中: V_1 为滴定样液所消耗的 2,6-二氯靛酚的体积, mL; V_2 为滴定时吸取样液的体积, mL; T 为 1 mL 2,6-二氯靛酚相当于抗坏血酸的毫克数, mg; V 为样液的体积, mL; m 为样液质量, g。

1.5.4 游离氨基酸含量的测定

吸取南果梨贮藏试验样液 1 mL, 加入 pH5.4 乙酸-乙酸钠缓冲溶液和茚三酮显色液各 1 mL, 混匀后于

100 ℃水浴 15 min, 冷却至室温(25 ℃)后加入 3 mL 60% 乙醇溶液稀释, 摇匀后在 570 nm 处测定吸光值。根据亮氨酸标准曲线拟合方程计算出游离氨基酸含量。

1.5.5 总酚含量的测定

总酚含量采用福林酚法测定^[23]。吸取南果梨贮藏试验样品 1 mL 至比色管, 再加入 9 mL 去离子水, 摇匀后精确量取 1 mL 稀释样品, 采用与标准曲线相同的方法进行比色。总酚含量的计算公式如下。

$$W = C \times V \times \frac{N}{m}$$

式中: W 为南果梨果汁的总酚含量, mg/L; C 为总酚标准曲线 $A_{760\text{ nm}}$ 处对应的质量浓度, mg/L; V 为稀释后样液体积, mL; N 为稀释倍数; m 为南果梨果汁样液体积, mL。

1.5.6 还原糖含量的测定

南果梨果汁的还原糖采用直接滴定法测定^[13]。吸取适量南果梨果汁样液, 经澄清剂 I 和澄清剂 II 除去蛋白质后, 以亚甲基蓝为指示剂, 在微沸的条件下滴定标定过的碱性酒石酸铜溶液, 根据南果梨果汁样品消耗的体积计算还原糖含量, 计算公式如下。

$$X = \frac{m_1}{m \times \frac{V}{250} \times 1\,000} \times 100$$

式中: X 为试样中还原糖含量, g/100 g; m_1 为碱性酒石酸铜溶液质量, mg; m 为试样质量, g; V 为测定时平均消耗试样溶液体积, mL; 250 为定容体积, mL。

1.5.7 总糖含量的测定

吸取南果梨果汁样品 2 mL 加入到比色管中, 再向比色管中加入 6% 苯酚 1.0 mL 和浓硫酸 5 mL 溶液摇匀, 沸水水浴显色 15 min 于 490 nm 处测量吸光值。重复 3 次, 取平均值代入总糖标准曲线拟合方程中计算出总糖含量。

1.6 酶促反应动力学研究

对不同贮藏温度下南果梨果汁褐变指数和 5-HMF 含量变化运用零级和一级动力学模型进行拟合分析^[24], 方程如下。

$$\begin{aligned} C &= C_0 + K_0 \times t \\ C &= C_0 e^{K_1 \cdot t} \end{aligned}$$

式中: C 为任意时间的指标测定值; C_0 为该指标的初始值; t 为时间, d; K_0 为零级反应动力学常数; K_1 为一级反应动力学常数。

1.7 数据处理与分析

所有试验均重复 3 次, 试验数据以平均值±标准差表示, 图像采用 Origin 8.0 软件绘制, 数据结果采用 DPS 软件进行方差分析($P < 0.05$), 试验数据与图表采用

Excel 2016 处理。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对南果梨果汁褐变指数的影响

不同贮藏温度对南果梨果汁褐变指数的影响如图 1 所示。

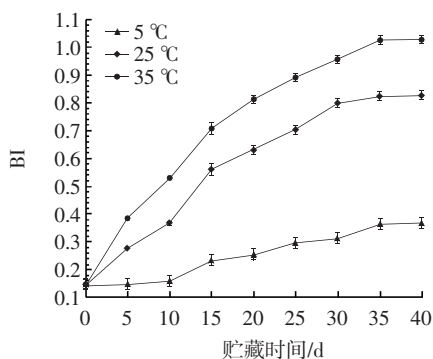


图 1 不同贮藏温度对南果梨果汁褐变指数的影响

Fig.1 Browning index of Nanguo pear juice stored at different temperatures

由图 1 可知,随着贮藏时间的延长,3 个温度的南果梨果汁的褐变指数均呈上升趋势,且温度越高褐变反应越快。果汁低温(5 °C)贮藏 40 d 后的褐变指数最小,而果汁高温(35 °C)贮藏 40 d 后的褐变指数较大。这说明贮藏温度是影响南果梨果汁非酶促褐变反应进行的重要因素,可以通过控制温度来抑制非酶促褐变的进行。

2.2 不同贮藏温度对南果梨果汁抗坏血酸含量的影响

果汁中的主要营养物质是抗坏血酸,其具有酸性和较强的抗氧化性。抗坏血酸的分解途径包括有氧分解和无氧分解。不同贮藏温度对南果梨果汁抗坏血酸含量的影响见图 2。

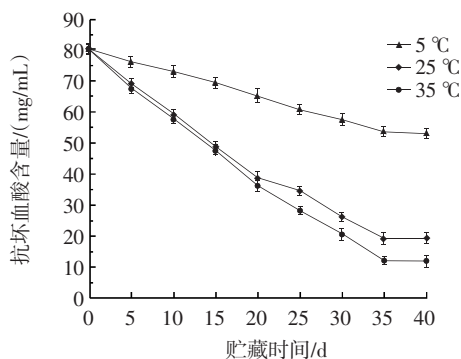


图 2 不同贮藏温度对南果梨果汁抗坏血酸含量的影响

Fig.2 Ascorbic acid content in Nanguo pear juice stored at different temperatures

由图 2 可知,在贮藏试验的前 20 d 样液中的抗坏血酸含量下降较快,而后 20 d 下降较为缓慢。这是由

于贮藏容器的顶部有一部分罐顶空容引起的有氧性降解,而随着容器内的含氧量降低,抗坏血酸无氧分解逐渐占据优势。对高温(35 °C)前后 20 d 数据进行分析,前 20 d 的抗坏血酸分解速率为 2.21 mg/(mL·d),而后 20 d 的抗坏血酸分解速率为 1.23 mg/(mL·d),两者相差 1.79 倍,可见在南果梨果汁反应体系中,有氧型抗坏血酸分解速率较无氧型快。

2.3 不同贮藏温度对南果梨果汁总酚含量的影响

南果梨果汁中含有较多的酚类物质,而酚类物质的化学活性较为活泼,极易容易氧化生成醌类物质,醌类物质易和亲核基团发生反应,并与其它酚类物质在高温下发生聚合形成呈色高分子聚合物。不同贮藏温度对南果梨果汁总酚含量的影响见图 3。

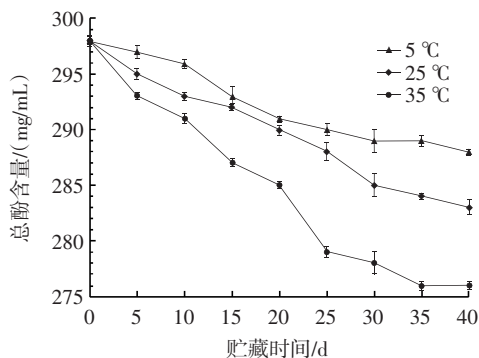


图 3 不同贮藏温度对南果梨果汁总酚含量的影响

Fig.3 Total phenol content of Nanguo pear juice stored at different temperatures

由图 3 可知,与 25 °C 和 35 °C 相比,在低温(5 °C)贮藏条件下总酚含量的变化不明显,而在高温条件下,如在 35 °C 贮藏 40 d 后,总酚含量下降了 7.38%。推断可能是由于包装前的排气工艺使体系含氧量降低,导致酚类不容易氧化,而由于较高温度的影响,酚类物质发生了分子间的聚合,导致了褐变的发生。结果表明,酚类物质并不是引起南果梨果汁非酶促褐变的主要原因,且酚类物质氧化缩合对南果梨果汁褐变的影响较小。

2.4 不同贮藏温度对南果梨果汁 5-HMF、还原糖和游离氨基酸含量的影响

美拉德反应是一类非常复杂的羰胺反应,在各试验条件下,可通过反应体系中的 5-HMF 含量(生成速率)与还原糖及游离氨基酸的含量(降解速率)对贮存体系中所发生的美拉德反应进行定量分析。5-HMF 是经过 Amadori 分子重排形成的一种中间产物,5-HMF 的存在不仅是贮藏体系发生褐变的重要条件,同时也是形成色素沉积的潜在条件,不同贮藏温度对南果梨果汁 5-HMF、还原糖和游离氨基酸含量的影响

见图4~图6。

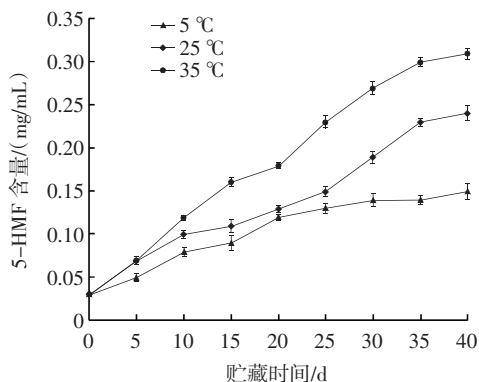


图4 不同贮藏温度对南果梨果汁5-HMF的影响

Fig.4 Content of 5-HMF in Nanguo pear juice stored at different temperatures

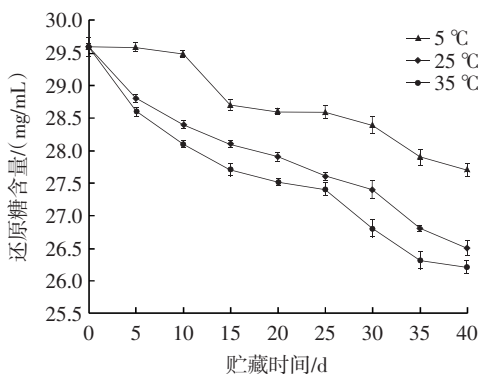


图5 不同贮藏温度对南果梨果汁还原糖含量的影响

Fig.5 Content of reducing sugar in Nanguo pear juice stored at different temperatures

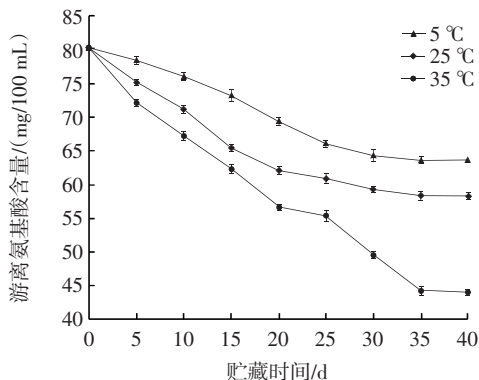


图6 不同贮藏温度对南果梨果汁游离氨基酸含量的影响

Fig.6 Content of free amino acids in Nanguo pear juice stored at different temperatures

由图4可知,在不同的温度条件下,南果梨果汁中的5-HMF含量在贮藏期间不断增加,这表明果汁中发生了美拉德反应。

结合图5、图6可知,南果梨果汁中的还原糖含量和游离氨基酸含量在贮藏期不断减少。尽管多糖在酸

性条件下会发生热水解,使果糖、葡萄糖等还原糖含量在一定程度上有所增加,且经过纤维素酶和果胶酶处理后会使得南果梨果汁中的低聚糖含量升高,但结合图4~图6可知,在5-HMF含量升高的同时,游离氨基酸和还原糖含量同步下降,这表明大部分还原糖和游离氨基酸发生了美拉德反应,美拉德反应是南果梨果汁发生非酶促褐变的主要因素。

2.5 不同贮藏温度对南果梨果汁总糖含量的影响

不同贮藏温度对南果梨果汁总糖含量的影响见图7。

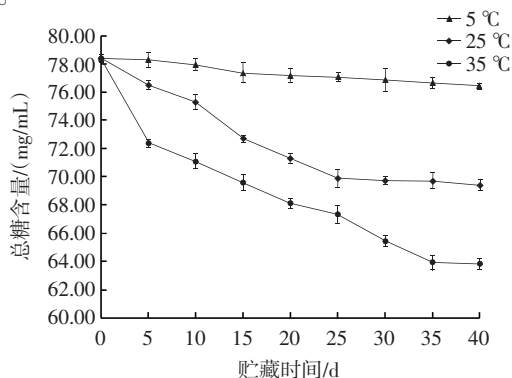


图7 不同贮藏温度对南果梨果汁总糖含量的影响

Fig.7 Total sugar content of Nanguo pear juice stored at different temperatures

由图7可知,在不同的温度条件下,南果梨果汁中的总糖含量在贮藏期均呈下降趋势,在35 °C下贮藏时总糖含量下降的速度最快。这是由于南果梨果汁处于酸性的环境中,酸性条件下贮藏会导致蔗糖的水解以及水解后低聚糖的美拉德反应,使得总糖含量随着贮藏时间的延长而减少。此外,焦糖化反应也可能是导致南果梨果汁中总糖含量变化的原因,但由于焦糖化反应发生要求的温度较高,而本试验的贮藏温度(5、25 °C和35 °C)偏低,不适合焦糖化反应的进行,可判断焦糖化反应在本试验体系参与度不高,对南果梨果汁非酶促褐变反应的影响较小。

2.6 不同贮藏温度对南果梨果汁pH值的影响

不同贮藏温度对南果梨果汁pH值的影响如图8所示。

由图8可知,在各温度条件下pH值并无明显变化,分析这是由于美拉德反应发生时还原糖和胺类物质聚合形成的糖胺会使体系的pH值降低而抑制反应,且在不同的反应温度下南果梨果汁发生的美拉德反应程度不同,由于果汁是一个较为复杂的反应体系,使得南果梨果汁具有一定的缓冲能力,也可能是由于贮藏试验时间较短,未能反映长期贮藏对南果梨果汁反应体系pH值的影响。

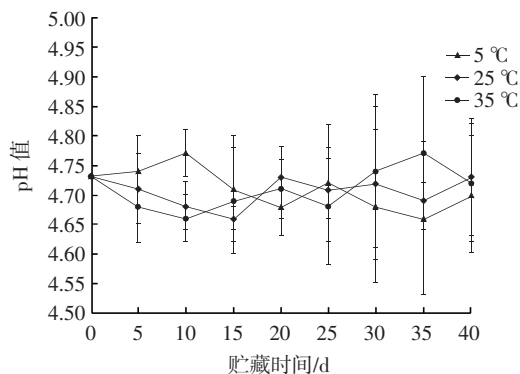


图8 不同贮藏温度对南果梨果汁 pH 值的影响

Fig.8 pH value of Nanguo pear juice stored at different temperatures

2.7 抗坏血酸氧化分解反应对南果梨果汁非酶促褐变的影响

不同贮藏温度下南果梨果汁抗坏血酸含量的反应动力学参数见表1。

表1 不同贮藏温度下南果梨果汁抗坏血酸含量的反应动力学参数

Table 1 Reaction kinetic parameters of ascorbic acid content in Nanguo pear juice stored at different temperatures

动力学模型	贮藏温度/℃	K_0	K_1	R^2
零级动力学 $n=0$	5	-3.825		0.999 9
	25	-8.682		0.988 3
	35	-9.733		0.994 4
一级动力学 $n=1$	5		-0.057	0.994 6
	25		-0.199	0.985 6
	35		-0.258	0.961 6

由表1可知,不同温度条件下抗坏血酸含量的动力学参数表明抗坏血酸含量变化同样遵循零级反应动力学的拟合公式,此结果与2.2结果吻合。

2.8 美拉德反应对南果梨果汁非酶促褐变的影响

美拉德反应的进行程度可用5-HMF的变化趋势和BI表示,不同贮藏温度下南果梨果汁中5-HMF含量及BI的反应动力学参数见表2、表3。

表2 不同贮藏温度下褐变指数(BI)的反应动力学参数

Table 2 Reaction kinetic parameters of browning index of Nanguo pear juice stored at different temperatures

动力学模型	温度/℃	K_0	K_1	R^2
零级动力学 $n=0$	5	0.036 5		0.975 4
	25	0.094 8		0.957 3
	35	0.105 8		0.960 9
一级动力学 $n=1$	5		0.015 4	0.948 1
	25		0.181 3	0.896 4
	35		0.155 4	0.900 0

表3 不同贮藏温度下南果梨果汁5-HMF含量的反应动力学参数

Table 3 Reaction kinetic parameters of 5-HMF content in Nanguo pear juice stored at different temperatures

动力学模型	温度/℃	K_0	K_1	R^2
零级动力学 $n=0$	5	0.016 7		0.944 7
	25	0.025 7		0.981 1
	35	0.035 2		0.984 0
一级动力学 $n=1$	5		0.210 4	0.858 6
	25		0.224 7	0.884 7
	35		0.200 2	0.912 4

由表2可知,在5℃和25℃的条件下南果梨果汁贮藏体系的褐变指数符合零级反应动力学的拟合公式(R^2 分别为0.975 4和0.957 3),这一结果与王素雅等^[25]关于香蕉汁非酶促褐变反应的研究相吻合。

由表3可知,由于5-HMF的增加量呈线性趋势,采用零级反应动力学和一级反应动力学对其含量的变化规律进行拟合,结果显示在任何温度条件下进行的贮藏试验都可用零级反应动力学公式进行拟合,且使用零级反应动力学方程进行拟合时,其相关系数(R^2)均大于一级反应动力学方程。

由表1~表3可知,抗坏血酸的氧化分解与5-HMF的生成有关,在35℃的情况下,抗坏血酸含量衰减和5-HMF含量增加均遵循零级反应动力学拟合公式(R^2 分别为0.994 4和0.984 0),在5℃的条件下褐变指数的变化规律可用零级反应动力学和一级反应动力学公式拟合(R^2 分别为0.975 4和0.948 1),表明抗坏血酸氧化降解产生的糠醛类物质是导致体系5-HMF含量增加的主要原因。

3 结论

本试验对南果梨果汁在不同温度条件(5、25、35℃)下进行贮藏,通过检测贮藏期的褐变指数、5-HMF含量、抗坏血酸含量、总酚含量、还原糖含量及游离氨基酸含量,并对上述指标采用零级和一级反应动力学模型进行拟合,研究了影响南果梨果汁非酶促褐变反应的因素。试验结果表明,褐变指数、抗坏血酸及5-HMF含量的变化规律遵循零级反应动力学拟合公式,还原糖与氨基化合物间发生的美拉德反应和抗坏血酸氧化分解反应是导致南果梨果汁贮藏期间非酶褐变的主要原因,多元酚氧化缩合反应和焦糖化反应对南果梨果汁非酶促褐变影响较小。

参考文献:

[1] 辛广,张维华,张兰杰,等.南果梨多酚氧化酶的研究[J].沈阳农

- 业大学学报, 1997, 28(4): 274-277.
- XIN Guang, ZHANG Weihua, ZHANG Lanjie, et al. Studies on polyphenol oxidase in flesh of nanguo pear[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1997, 28(4): 274-277.
- [2] 侯冬岩, 回瑞华, 杨梅, 等. 南果梨中总黄酮的光谱分析及抗氧化性能测定[J]. 食品科学, 2005, 26(2): 193-196.
- HOU Dongyan, HUI Ruihua, YANG Mei et al. Determination of total flavonoids and the antioxidation effect in Nanguo pear[J]. Food Science, 2005, 26(2): 193-196.
- [3] PHAM H T T, BISTA A, KEBEDE B, et al. Insight into non-enzymatic browning of shelf-stable orange juice during storage: A fractionation and kinetic approach[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(9): 3765-3775.
- [4] 王鑫, 魏婧, 马蕊, 等. 蓝莓果汁贮藏中非酶褐变影响因素评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 94-99.
- WANG Xin, WEI Jing, MA Rui, et al. Evaluation of non-enzymatic browning factors during storage of blueberry juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 94-99.
- [5] 刘苏苏. 南果梨果汁饮料工艺技术及其稳定性研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2016.
- LIU Susu. The study of Nanguo pear juice beverage processing technology and the stability[D]. Jinzhou: Bohai University, 2016.
- [6] 韩丹. 果胶酶提高南果梨出汁率工艺的研究[J]. 吉林工商学院学报, 2013, 29(5): 91-93, 119.
- HAN Dan. Study on the technology of pectinase to improve the juice yield of Nanguo pear[J]. Journal of Jilin Business and Technology College, 2013, 29(5): 91-93, 119.
- [7] 吕长鑫, 纪秀凤, 刘苏苏, 等. 响应面优化与粒径分析法复配南果梨乳饮料稳定剂[J]. 中国食品学报, 2018, 18(5): 159-166.
- LÜ Changxin, JI Xiufeng, LIU Susu et al. Optimization of the complex stabilizer of Nanguo pear milk beverage by response surface methodology and particle size analysis method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(5): 159-166.
- [8] 苏菲烟, 雷激, 刘江, 等. 雪梨多酚氧化酶酶学特性及其果汁褐变控制技术研究[J]. 食品科技, 2020, 45(2): 303-310.
- SU Fiyan, LEI Ji, LIU Jiang, et al. Study on enzymatic characteristics of polyphenol oxidase in snow pear and inhibiting technology of fruit juice browning[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 303-310.
- [9] 王亮, 姚森, 童彦, 等. 百香果芒果复合果汁饮料储藏过程中色泽变化及其动力学研究[J]. 饮料工业, 2020, 23(1): 11-17.
- WANG Liang, YAO Sen, TONG Yan, et al. Color changes and its kinetics of passion fruit & mango mix fruit juice drink during storage[J]. Beverage Industry, 2020, 23(1): 11-17.
- [10] 张婷婷. 基于微波及声热技术的苹果全果果汁褐变抑制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHANG Tingting. Microwave combined with thermosonication for browning inhibition in apple whole fruit juice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [11] 王楠. 不同加热方式对三种葡萄浓缩汁品质变化的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019.
- WANG Nan. Effects of different heating methods on the quality changes of three grape juice concentrates[D]. Ala'er: Tarim University, 2019.
- [12] 马婧. 猕猴桃 NFC 果汁的超高压杀菌处理及其贮藏期品质变化[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- MA Jing. Ultra-high pressure sterilization of kiwifruit NFC juice and its quality change during storage[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.
- [13] 胡云峰, 唐裕轩, 李宁宁, 等. 枸杞热风干制过程中非酶促褐变反应研究[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(6): 125-129.
- HU Yunfeng, TANG Yuxuan, LI Ningning, et al. Research on non enzymatic browning reaction in hot air drying processing of *Lycium barbarum*[J]. Storage and Process, 2018, 18(6): 125-129.
- [14] 王菁. 枸杞酒酿造过程中的褐变及控制研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- WANG Jing. Study on the browning and control in the brewing process of Chinese wolfberry wine[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [15] 崔霖芸, 陈哲洪, 谢娟, 等. 野木瓜果汁非酶褐变析因研究[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 99-102.
- CUI Linyun, CHEN Zhehong, XIE Juan, et al. Factors analysis on non-enzymatic browning of *Stauntonia chinensis* juice during storage[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 99-102.
- [16] 罗昱. 刺梨果汁褐变与风味调控研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- LUO Yu. Study on browning and flavor control of *Rosa roxburghii* juice[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [17] 马永强, 魏婧, 王鑫, 等. 蓝莓汁抗坏血酸体系非酶褐变反应动力学[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 109-113.
- MA Yongqiang, WEI Jing, WANG Xin, et al. Kinetics of non-enzymatic browning reaction from ascorbic acid model system of blueberry juice[J]. Food Science, 2016, 37(1): 109-113.
- [18] 王素雅, 王璋. 香蕉汁储藏过程中非酶褐变的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(12): 81-85.
- WANG Suya, WANG Zhang. Research on nonenzymatic browning of banana juice during storage[J]. Food Science, 2005, 26(12): 81-85.
- [19] 杨毅. 浓缩砀山酥梨汁非酶促褐变机理及其控制技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- YANG Yi. Research on nonenzymatic browning and control technology of Dangshan pear juice concentrate[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [20] 尚海涛, 宣晓婷, 崔燕, 等. 超高压鲜榨梨汁褐变因素与控制研究[J]. 农产品加工, 2020(4): 1-5.
- SHANG Haitao, XUAN Xiaoting, CUI Yan, et al. Study on browning factors and control technology of high pressure processing on fresh pear juice[J]. Farm Products Processing, 2020(4): 1-5.
- [21] 袁芳, 邱诗铭, 李丽, 等. 异抗坏血酸与氯化钙联合处理对鲜切芒果的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 272-278.
- YUAN Fang, QIU Shiming, LI Li, et al. Effects of combined treatment by erythorbic acid and calcium chloride on preservation of

- fresh-cut mango[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 272-278.
- [22] 汤海青, 欧昌荣, 蔡敏俐, 等. 电位滴定法测定葡萄酒中的抗坏血酸[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 264-267.
- TANG Haiqing, OU Changrong, CAI Minli, et al. Determination of ascorbic acid in wines by automatic potentiometric titration[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(24): 264-267.
- [23] 周晓晴, 胡立文, 罗琦, 等. 茶叶籽油中茶多酚和儿茶素的测定[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 291-295, 301.
- ZHOU Xiaoqing, HU Liwen, LUO Qi, et al. Determination of tea polyphenols and catechin in tea seed oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 291-295, 301.
- [24] 刘忆冬, 江英, 陈龙, 等. 不同储藏温度下玻璃罐装番茄酱色泽

变化的动力学研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 31-35.

- LIU Yidong, JIANG Ying, CHEN Long, et al. Research on kinetics of color change of canned tomato paste in glass during storage at different temperatures[J]. Storage and Process, 2020, 20(1): 31-35.
- [25] 王素雅, 王璋. 香蕉汁加工过程中褐变原因初探[J]. 食品工业科技, 2002, 23(5): 13-16.
- WANG Suyu, WANG Zhang. Study on the cause of browning in the processing of banana juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(5): 13-16.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2021-09-08