

## 低温等离子体处理的鲜切猕猴桃片货架期预测模型

陈月圆, 赵武奇\*, 贾梦科, 高贵田, 张清安, 孟永宏

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院 西安 710119)

**摘要** 研究贮藏温度对低温等离子体处理的鲜切猕猴桃片品质和菌落总数的影响, 建立品质指标和菌落总数货架期预测模型。将经低温等离子体处理的鲜切猕猴桃片分别在 0, 5, 10, 15, 20, 25 °C 贮藏, 定期测定 VC 含量、叶绿素含量、总酚含量、菌落总数、脆性、色差及固酸比, 探讨温度对其的影响, 确定各监测指标的拟合方程。结合 Arrhenius 模型和 Belehradck 模型, 建立鲜切猕猴桃片品质指标和菌落总数的货架期预测模型。结果表明: 贮藏温度对固酸比、总酚含量及叶绿素含量的影响不显著, 对色差、脆性、VC 含量及菌落总数的影响显著。鲜切猕猴桃片贮藏过程中 VC 含量、脆性、色差及菌落总数的变化分别遵循一级反应、一级反应、零级反应及 Logistics 方程模型。建立的鲜切猕猴桃片各品质指标货架期预测模型  $SL_{脆性}$ 、 $SL_{色差}$ 、 $SL_{VC}$  及菌落总数货架期预测模型  $SL_{菌落}$  对 3 °C 贮藏的猕猴桃片货架期的预测值与实测值的相对误差分别为 4.03%, 3.41%, 2.4%, 2.8%, 预测效果好。模型可用于预测 0~25 °C 贮藏的鲜切猕猴桃片的货架期。

**关键词** 鲜切猕猴桃片; 货架期预测模型; 低温等离子体

**文章编号** 1009-7848(2022)01-0179-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.020

猕猴桃质地柔软, 口感酸甜, 被称为“VC 之王”<sup>[1-2]</sup>, 富含钾、镁、纤维素<sup>[3]</sup>, 含有类胡萝卜素、叶绿素<sup>[4]</sup>、果胶、单宁等, 营养丰富, 市场需求很大。鲜切猕猴桃片具有新鲜、营养、便携、无公害等优点<sup>[5]</sup>, 可满足人们追求健康生活的目的, 发展前景广阔。而鲜切会对猕猴桃造成机械损伤, 破坏其营养成分, 使猕猴桃片易被微生物污染, 货架期缩短<sup>[6-7]</sup>, 降低其商业价值。低温等离子体处理可明显延长果蔬的保鲜期, 维持鲜切果蔬的营养与感官品质<sup>[8-9]</sup>。食品货架期预测是食品质量管理的重要方式, 可对食品的品质和安全性做出快速、准确的评估与预测<sup>[10]</sup>, 进而为食品贮藏、销售方案的制定及工艺配方的改进提供理论支持<sup>[11]</sup>, 对确保消费者身体健康, 维护品牌信誉有着重要作用。目前零级、一级反应、Logistic<sup>[12]</sup>、Weibull<sup>[13]</sup>及修正的 Compertz<sup>[14-15]</sup>模型是典型的描述食品品质降解、微生物生长与贮藏时间关系的模型; Arrhenius<sup>[16]</sup>可以反映贮藏期间反应速率与贮藏温度的关系; Belehradck<sup>[17]</sup>模型主要用来描述温度对细菌生长速率和迟滞期的影响。张文等<sup>[18]</sup>分别采用零级、一

级反应、Logistic 模型、Weibull 模型对黄金、玉冠和丰水 3 种梨的质地指标进行货架期预测, 结果表明 Weibull 模型的拟合度  $R^2$  最大, 可以快速预测梨的货架期。高灿灿等<sup>[19]</sup>研究鲜切小白菜和鲜切生菜贮藏期间感官品质、细菌总数及大肠菌群数的变化, 并利用修正的 Compertz 方程进行曲线拟合, 所得模型可靠; 胡位歆等<sup>[20]</sup>利用 Arrhenius 方程, 对 4~37 °C 下草莓 VC 及 TA 的动力学变化进行拟合, 构建货架期模型的预测效果良好。雷昊等<sup>[21]</sup>采用 Arrhenius 及 Belehradck 模型分析鲜切杭白菜品质变化动力学过程, 建立货架期预测模型的预测效果良好。本文以低温等离子体处理的鲜切猕猴桃片为样品, 建立鲜切猕猴桃片品质指标和菌落总数货架期预测模型, 为鲜切猕猴桃片的贮藏提供理论支持。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料与试剂

‘海沃德’猕猴桃, 陕西佰瑞猕猴桃研究院种植基地; 氢氧化钠、氯化钡、草酸、酚酞, 国药集团化学试剂有限公司; 盐酸, 天津市兴复精细化工研究所; 甲醇、PVPP, 天津市盛奥化学试剂有限公司; 邻苯二甲酸氢钾, 北京奥博星生物技术有限责任公司; 碳酸氢钠, 天津市津北精细化工有限公

收稿日期: 2021-01-17

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020NY-099)

作者简介: 陈月圆(2000—), 女, 硕士生

通信作者: 赵武奇 E-mail: zqw65@163.com

司;抗坏血酸、2,6-二氯酚靛酚,天津津东天正精细化学试剂厂;三氯乙酸,天津市恒兴化学试剂制造有限公司;硫代巴比妥酸,天津市天力化学试剂有限公司。

## 1.2 仪器与设备

BK130/36 低温等离子体,美国 PHENIX 科技有限公司;TA XT Plus 物性测试仪,英国 Stable Micro System 公司;紫外可见分光光度计、手持式折光仪,北京普析通用仪器有限责任公司;WSC-S 色差仪,上海精密仪器公司。

## 1.3 试验方法

1.3.1 鲜切猕猴桃片样品制备 选取成熟度、大小基本一致,无机械损伤与病虫害的猕猴桃,经去皮后切成厚度为 10 mm 的猕猴桃片,选取表面积为  $(23 \pm 0.6) \text{cm}^2$  的猕猴桃片作为样品,以单层单列的方式放入保鲜盒中,每盒放置 2 片,在电压 26 kV,时间 120 s 下进行等离子体处理。

1.3.2 不同贮藏温度对鲜切猕猴桃片品质指标及菌落总数影响试验 将处理后的样品分别放置在 0, 5, 10, 15, 20, 25 °C 的恒温培养箱中贮藏,0, 5, 10 °C 每隔 3 d, 15 °C 每隔 2 d, 20, 25 °C 每隔 1 d, 分别测定固酸比、总酚含量、叶绿素含量、色差、脆性、VC 含量和菌落总数,每个指标重复测定 3 次。

1) 质构测定方法 使用带有 5 mm 探头的质构仪通过穿刺试验测定鲜切猕猴桃片的硬度与脆性。测前、测试中及返回速度均设为 1 mm/s。

2) 色泽测定方法 使用色差仪测量鲜切猕猴桃片的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,色差按公式(1)计算。

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

式中, $a^*$ 、 $b^*$ ——鲜切猕猴桃片贮藏 10 d 后的色泽; $L_0$ 、 $a_0$ 、 $b_0$ ——鲜切猕猴桃片初始色泽。

3) 理化指标测定方法 VC 采用 2,6-二氯酚靛滴定法,参照 GB/T 5009.86-2016<sup>[22]</sup>;TA 酸碱滴定法,参照 GB/T 12456-2008<sup>[23]</sup>;SSC 测定使用手持式阿贝折光仪;固酸比=可溶性固形物/可滴定酸。

4) 菌落总数测定 菌落总数参照 GB 4789.2-2016<sup>[24]</sup>测定,菌落降低对数值按公式(2)计算。

$$\text{菌落降低对数值} = \lg \frac{N_{10}}{N_t} \quad (2)$$

1.3.3 鲜切猕猴桃片品质指标货架期预测模型的

建立 分别利用零级(式 3)、一级反应(式 4)、Logistic(式 5)及 Weibull 方程(式 6),对试验数据进行拟合,根据拟合度确定各监测指标的拟合方程和反应速率  $K$ ;利用 Arrhenius 模型(式 7),根据斜率、截距求出各指标的活化能与指前因子  $A_0$ ,建立各指标的货架期预测模型;用 3 °C 贮藏条件下鲜切猕猴桃片的试验数据,评价货架期模型的预测效果。

$$C_t = C_0 + k \times t \quad (3)$$

$$C_t = C_0 \times e^{k \times t} \quad (4)$$

$$C_t = \frac{A}{1 + e^{-B(t-M)}} \quad (5)$$

$$C_t = a - (a - c) e^{-(B \times t)^d} \quad (6)$$

$$K = A_0 \times e^{(-E_a/R \times T)} \quad (7)$$

式中, $k$ 、 $K$ ——鲜切猕猴桃片理化指标的反应速率常数; $C_t$ 、 $C_0$ ——鲜切猕猴桃片理化指标在  $t$  时刻与初始的参数; $t$ ——鲜切猕猴桃片的贮藏时间, $d$ ; $a$ 、 $A$ ——理化指标最大值参数; $B$ ——理化指标变化率最大时的斜率; $M$ ——理化指标变化率最大时的时间, $d$ ; $c$ ——理化指标最小值参数; $d$ ——拟合参数; $A_0$ ——指前因子; $E_a$ ——鲜切猕猴桃片各理化指标的反应活化能, J/mol; 气体常数为 8.3144 J/(mol·K); $T$ ——鲜切猕猴桃片的贮藏温度, K。

将 Arrhenius 模型(式 7)与品质变化动力学模型(式 3、式 5)联立分别得到鲜切猕猴桃片零级反应(式 8)与一级反应的货架期模型(式 9)。

$$SL_0 = \frac{C_t - C_0}{A_0 \times e^{-E_a/R \times T}} \quad (8)$$

$$SL_1 = \frac{\ln \frac{C_t}{C_0}}{A_0 \times e^{-E_a/R \times T}} \quad (9)$$

1.3.4 鲜切猕猴桃片菌落总数货架期预测模型的建立 分别利用零级(式 3)、一级反应(式 4)、Weibull(式 6)、Logistic 变形方程(式 10)及修正的 Compertz 方程(式 11)对菌落总数的试验数据进行拟合,根据拟合度的大小,确定鲜切猕猴桃片菌落总数的拟合方程及最大比生长速率  $\mu_{\max}$  迟滞期  $\lambda$ ;利用不同温度下的  $\mu_{\max}$  及  $\lambda$  对 Belehradck 模型(式 12、式 13)进行拟合,得出 Belehradck 模型中

参数  $b_\mu$ 、 $T_{\min\mu}$  与温度的关系，建立鲜切猕猴桃片菌落总数的货架期预测模型(式 14)；用 3 °C 贮藏条件下鲜切猕猴桃片的试验数据对模型进行检验，以准确因子  $A_t$ (式 15)、偏差因子  $B_t$ (式 16)及相对误差为标准评价模型的预测效果。

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) / 1 + e^{\frac{4\mu_{\max}(A-t)}{N_{\max} - N_0} + 2} \quad (10)$$

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) \times e^{-\frac{2.718\mu_{\max}(A-t)}{N_{\max} - N_0}} \quad (11)$$

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b_\mu \times (T - T_{\min\mu}) \quad (12)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = b_\lambda \times (T - T_{\min\lambda}) \quad (13)$$

$$SL = \frac{1}{[b_\lambda \times (T - T_{\min\lambda})]^2} - \frac{(N_{\max} - N_0) \left[ \left( \ln \frac{N_{\max} - N_0}{N_t - N_0} - 1 \right) - 2 \right]}{4 [b_\mu \times (T - T_{\min\mu})]^2} \quad (14)$$

$$A_t = 10^{\frac{\sum |N_{\text{预测}} - N_{\text{实测}}|}{n}} \quad (15)$$

$$B_t = 10^{\frac{\sum |N_{\text{预测}} - N_{\text{实测}}|}{n}} \quad (16)$$

式中,  $N_t$ 、 $N_0$ 、 $N_{\max}$ ——猕猴桃片菌落总数  $t$  天时的值、初始值与最大值,  $\lg(\text{CFU/g})$ ;  $t$ ——鲜切猕猴桃片的贮藏时间,  $d$ ;  $\lambda$ ——迟滞期,  $d$ ;  $\mu_{\max}$ ——鲜切猕猴桃片菌落的最大比生长速率;  $T_{\min\mu}$ 、 $T_{\min\lambda}$ ——细菌生长的最低温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $N_{\text{预测}}$ 、 $N_{\text{实测}}$ ——3 °C 下菌落总数的预测值与实测值,  $\lg(\text{CFU/g})$ ;  $N_t$ 、 $N_{10}$ ——处理组和对照组贮藏 10 d 后猕猴桃片的菌落总数,  $\lg(\text{CFU/g})$ 。

#### 1.4 数据处理

利用 Microsoft excel 进行数据统计、SPSS statistics 18.0 在 0.05 水平进行显著性分析、Origin 8.5 软件进行绘图与模型拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 贮藏温度对鲜切猕猴桃片理化指标及菌落总数的影响

如图 1 所示,随着贮藏时间的延长,固酸比大部分在 10~11 的范围内波动,贮藏温度对鲜切猕猴桃片固酸比的影响不显著( $P>0.05$ )。当贮藏温度高时,呼吸作用强,消耗 SSC 的同时生成了 TA,

而等离子体处理可以抑制呼吸作用,减少 SSC 的消耗与 TA 的生成,维持 SSC 及 TA 含量的稳定,使鲜切猕猴桃片始终保持酸甜可口、香甜美味的口感。

如图 2 所示,在贮藏期内,总酚含量在 3.2~3.4  $A_{280\text{nm}}/\text{g}$  范围内波动,贮藏温度对鲜切猕猴桃片总酚含量的影响不显著( $P>0.05$ )。多酚氧化酶经低温等离子体钝化处理后,活性随温度的变化不显著,可较好地保存鲜切猕猴桃片中总酚含量。

如图 3 所示,随着贮藏时间的延长,鲜切猕猴桃片的叶绿素含量不断下降,然而其变化不显著( $P>0.05$ ),且 15、20、25 °C 贮藏条件下的叶绿素含量略低于 0 °C 和 5 °C。叶绿素易因温度、pH 等因

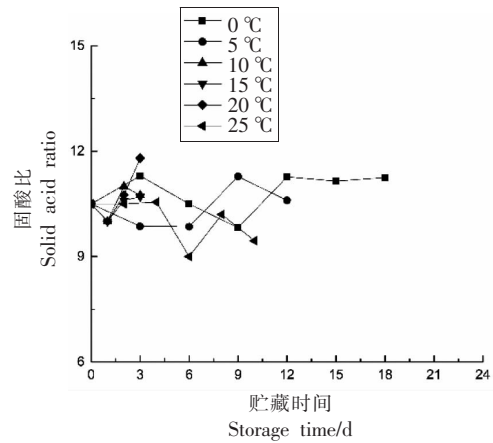


图 1 贮藏温度对固酸比的影响

Fig.1 Effect of storage temperature on solid acid ratio

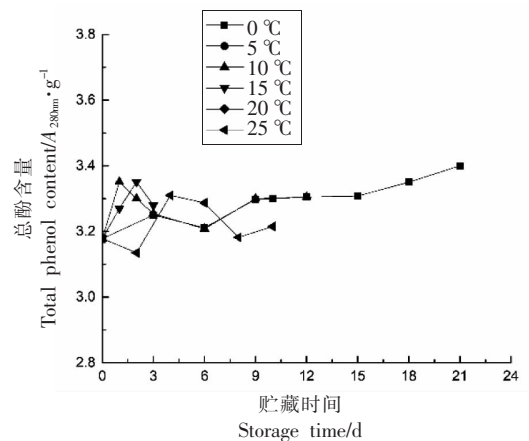


图 2 贮藏温度对总酚含量的影响

Fig.2 Effect of storage temperature on total phenol content

素而降解,高温可以增强酶活性,提高脱镁反应速率,加速叶绿素的降解,使叶绿素含量降低,而等离子体处理可以钝化叶绿素降解酶活性,延缓叶绿素的降解,使其含量相对稳定。

如图4所示,随着贮藏时间的延长,鲜切猕猴桃片的色差逐渐增大,且温度越高,色差增大越快。鲜切猕猴桃片的色泽与叶绿素含量、POD活性等密切相关,温度是影响叶绿素含量、POD活性的主要因素,高温可以增强POD活性,加速脱镁反应,加快叶绿素降解,造成鲜切猕猴桃片的色泽损失,导致色差增大。

如图5所示,随贮藏时间的延长脆性不断下降,温度越高,脆性下降越快。15、20、25℃时,鲜切猕猴桃片的脆性急剧下降,3 d内降到460 g·s左右,而0、5、10℃时下降缓慢,在贮藏末期,脆性仍在500 g·s左右。贮藏温度越高,呼吸作用及POD活性越强,使鲜切猕猴桃片品质恶化加快,脆性急剧下降,而低温可以减缓这一过程,使脆性维持在较高水平。

如图6所示,随着贮藏时间延长,鲜切猕猴桃片的VC含量逐渐降低,温度越高,VC含量越低;与其它处理组比较,0、5℃的处理下VC含量下降缓慢,在贮藏末期VC含量仍在95 mg/100 g左右。VC容易因光照、温度、酶等因素发生降解,低温可以抑制APX等与VC降解有关酶活性,延缓VC的降解速率,提高VC保存率。

如图7所示,随着贮藏时间延长,菌落总数逐渐增加,温度越高,菌落总数增加越快。5、20、25℃贮藏条件下的菌落生长速度显著大于0、5、10℃( $P<0.05$ ),且3 d后,5、10℃贮藏环境下的菌落总数显著高于0℃( $P<0.05$ )。可见,低温更有利于鲜切猕猴桃片的保鲜。

贮藏温度对鲜切猕猴桃片固酸比、总酚及叶绿素含量的影响不显著( $P>0.05$ ),对脆性、色差、菌落总数及VC含量的影响显著( $P<0.05$ ),脆性、色差、菌落总数及VC含量可以反映不同贮藏温度对鲜切猕猴桃片品质的影响。因此,建立鲜切猕猴桃片的货架期模型时,将脆性、色差、菌落总数及VC含量作为监测指标。

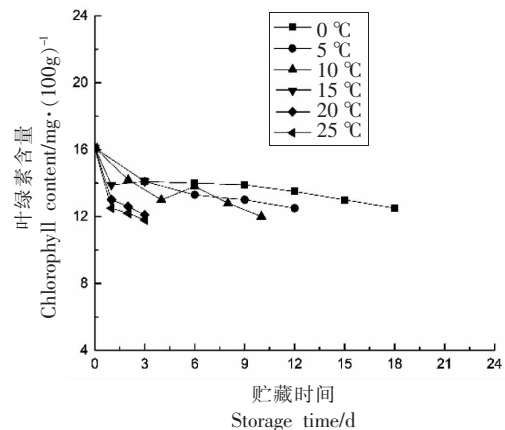


图3 贮藏温度对叶绿素含量的影响

Fig.3 Effect of storage temperature on chlorophyll content

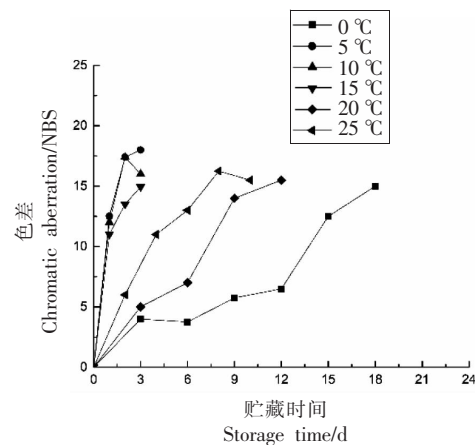


图4 贮藏温度对色差的影响

Fig.4 Effect of storage temperature on chromatic aberration

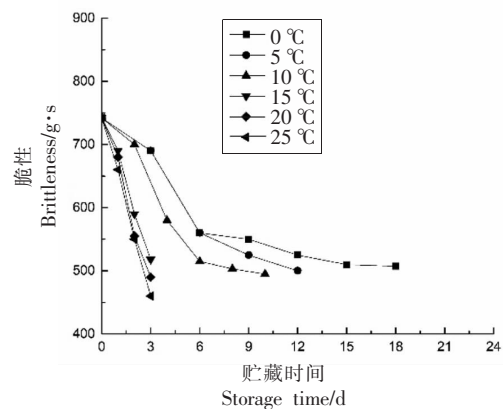


图5 贮藏温度对脆性的影响

Fig.5 Effect of storage temperature on brittleness



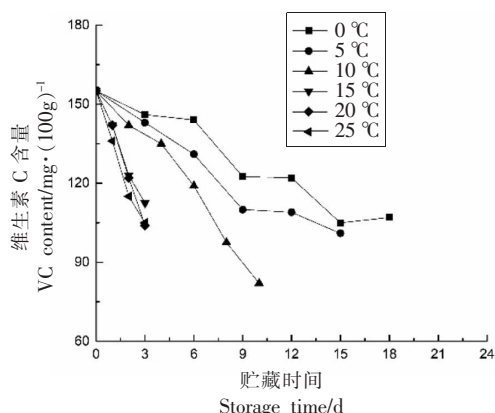


图 6 贮藏温度对 VC 含量的影响

Fig.6 Effect of storage temperature on VC content

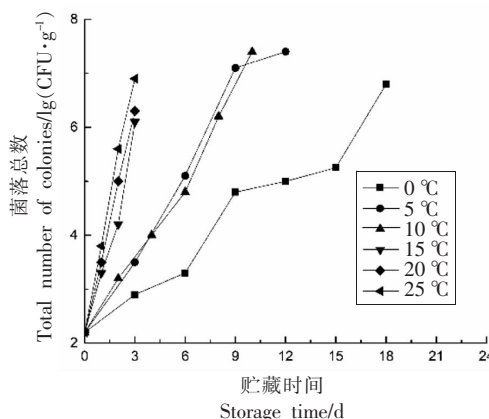


图 7 贮藏温度对菌落总数的影响

Fig.7 Effect of storage temperature on the total number of colonies

## 2.2 品质指标货架期预测模型的建立

分别用零级、一级反应方程、Logistic 方程及 Weibull 方程对鲜切猕猴桃片贮藏过程中品质指

标随时间变化的数据进行拟合,得到不同温度下,不同拟合方程对鲜切猕猴桃片脆性、色差、VC 含量变化的拟合度如表 1 所示。

表 1 不同拟合方程的拟合度  
Table 1 Fitness of different fitting equations

方程	指标	R <sup>2</sup>						平均拟合度
		0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	
零级	脆性	0.54568	0.70739	0.56988	0.98917	0.98917	0.97929	0.79676
	色差	0.9699	0.97396	0.93521	0.93729	0.90558	0.90990	0.93864
	VC	0.93691	0.90086	0.98503	0.95747	0.96274	0.98230	0.95422
一级	脆性	0.93557	0.97987	0.9697	0.97638	0.94216	0.97122	0.96248
	色差	0.92885	0.93574	0.84328	0.64126	0.57875	0.64864	0.76275
	VC	0.93691	0.9568	0.98503	0.97844	0.98591	0.98133	0.97074
Logistic	脆性	0.51484	0.64068	0.50739	0.97861	0.93297	0.97043	0.75749
	色差	0.91827	0.96113	0.95335	0.8985	0.95311	0.93487	0.93654
	VC	0.9249	0.90743	0.99566	0.98221	0.97521	0.98471	0.96169
Weibull	脆性	0.97556	0.9657	0.96872	0.98253	0.93847	0.91141	0.95707
	色差	0.93814	0.94004	0.87371	0.84959	0.95654	0.99709	0.92585
	VC	0.90291	0.90969	0.99637	0.7654	0.96275	0.92130	0.90974

由表 1 可知,零级反应、一级反应、Logistic 方程及 Weibull 方程对猕猴桃片脆性、色差、VC 含量拟合效果较好。由平均拟合度可知,一级反应的线性动力学方程可以更准确的反映等离子体处理后鲜切猕猴桃片在贮藏过程中 VC 含量和脆性的变化,零级反应在反映色差的变化趋势上更有优势,拟合精度更高,因此使用一级反应的线性动力学方程对鲜切猕猴桃片 VC 含量和脆性的变化进行

表征,零级反应动力学方程对色差的变化进行表征。将不同温度下的鲜切猕猴桃片 VC 含量与脆性的试验数据与一级反应方程进行拟合,将不同温度下的色差试验数据与零级反应方程拟合,分别可得到反应速率 K,其结果如表 2 所示。

由表 2 可知,温度越高,鲜切猕猴桃片的脆性、色差、VC 含量的反应速率(绝对值)越大,即贮藏温度越低,鲜切猕猴桃片品质下降越慢,可见低

温贮藏可以减缓鲜切猕猴桃片的品质衰败,延长货架期。

温度是贮藏过程中鲜切猕猴桃片品质变化的重要影响因素, Arrhenius 模型可精准描述温度与

反应速率的关系。利用不同贮藏温度下鲜切猕猴桃片各指标值反应速率常数  $k$  分别与 Arrhenius 方程进行拟合,计算出脆性、色差及 VC 的反应活化能和指前因子  $A_0$ ,结果如表 3 所示。

表 2 不同贮藏温度下的反应速率常数

Table 2 Rate constant at different temperatures

指标	K					
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
脆性	-0.0252	-0.0421	-0.0500	-0.1224	-0.1274	-0.1595
色差	0.8079	1.3055	1.5520	4.7542	5.8069	6.1914
VC	-0.0240	-0.0361	-0.0637	-0.1083	-0.1239	-0.1386

表 3 不同指标的指前因子、活化能及相关系数

Table 3 Pre-finger factors, activation energies and fitness of different indicators

指标	指前因子 $A_0$	活化能/ $J \cdot mol^{-1}$	$R^2$
脆性	$2.5248 \times 10^8$	$5.2146 \times 10^4$	0.9255
色差	$4.0256 \times 10^{11}$	$6.1146 \times 10^4$	0.9052
VC	$1.2274 \times 10^8$	$5.0535 \times 10^4$	0.9351

由表 3 可知, Arrhenius 方程对脆性、色差、VC 含量变化的拟合度均大于 0.9, 拟合精度高, 可用于构建鲜切猕猴桃片的货架期预测模型。将鲜切猕猴桃片的脆性、色差及 VC 的活化能  $E_a$ 、指前因子  $A_0$  分别代入式(8)、式(9)可得出脆性、色差、VC 的货架期模型。

脆性货架期模型:

$$SL_{\text{脆性}} = \frac{\ln C_0 - \ln C_s}{2.5248 \times 10^8 \times e^{-\frac{5.2146 \times 10^4}{8.3147T}}} \quad (17)$$

色差货架期模型:

$$SL_{\text{色差}} = \frac{S_s - S_0}{4.0256 \times 10^{11} \times e^{-\frac{6.1147 \times 10^4}{8.3147T}}} \quad (18)$$

VC 货架期模型:

$$SL_{\text{VC}} = \frac{\ln V_0 - \ln V_s}{1.2274 \times 10^8 \times e^{-\frac{5.0535 \times 10^4}{8.3147T}}} \quad (19)$$

式中,  $C_0$ 、 $S_0$ 、 $V_0$ ——脆性、色差、VC 的初始值;  $C_s$ 、 $S_s$ 、 $V_s$ ——脆性、色差、VC 的货架期终点值。

### 2.3 菌落总数货架期预测模型的建立

不同温度下的鲜切猕猴桃片菌落总数对不同预测方程的拟合度如表 4 所示。由表 4 可知, 零级反应、一级反应、Logistic 变形方程及修正的 Compertz 方程的  $R^2$  均大于 0.9, 拟合精度高, 其中 Logistic 变形方程的平均拟合度最高。

表 4 不同拟合方程的拟合度

Table 4 Fitness of different fitting equations

方程	$R^2$						平均拟合度
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	
零级反应	0.95818	0.9474	0.92292	0.95655	0.96843	0.99347	0.95783
一级反应	0.95718	0.9464	0.92092	0.95655	0.96703	0.99287	0.95183
Logistic	0.94448	0.9792	0.97146	0.98375	0.99830	0.99683	0.97900
Weibull	0.86898	0.93944	0.96576	0.65760	0.59658	0.55760	0.76402
修正 Compertz	0.94681	0.95347	0.94459	0.97742	0.99856	0.99313	0.96900

不同温度  $T$  对  $\sqrt{\mu_{\max}}$ 、 $\sqrt{\frac{1}{\lambda}}$  的拟合效果见图 8, 拟合的线性方程为式(20)和式(21)。

$$\sqrt{\mu_{\max}} = 0.04773 \times (T + 10.35824) \quad (20)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = 0.03196 \times (T + 10.74197) \quad (21)$$

由图 8 可知, 随着温度升高, 鲜切猕猴桃片菌落总数的最大比生长速率  $\mu_{\max}$  增大, 迟滞期  $\lambda$  减小。由式(20)、(21)可知, Belehradck 模型参数为:  $b_{\mu} = 0.04773$ ,  $T_{\min\mu} = -10.35824$ ,  $b_{\lambda} = 0.03196$ ,

$T_{\min\lambda} = -10.74197$ 。以菌落总数达到  $6.16 \lg(\text{CFU/g})$  作为货架期终点<sup>[25]</sup>。将上述参数代入式(14), 得到鲜切猕猴桃片基于菌落总数的货架期预测模型  $SL_{\text{菌落}}$ , 如式(22)所示。

$$SL_{\text{菌落}} = \frac{1}{[0.03196 \times (T + 10.74197)]^2} - \frac{(7.9 - N_0) \left[ \left( \ln \frac{7.9 - N_0}{6.16 - N_0} - 1 \right) - 2 \right]}{4 [0.04773 \times (T + 10.35824)]^2} \quad (22)$$

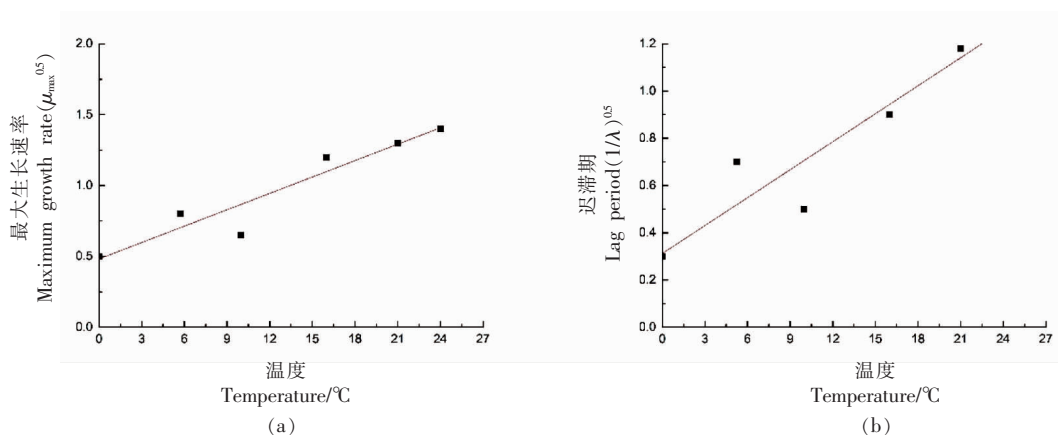


图 8 最大生长速率、迟滞期与温度关系

Fig.8 Relationship between maximum growth rate, lag period and temperature

### 3 模型的检验

#### 3.1 品质指标货架期预测模型的检验

试验表明, 当鲜切猕猴桃片达到感官拒绝点时, VC 含量下降 20%、脆性降到  $490 \text{ g} \cdot \text{s}$ 、色差上升到 14。表 5 为鲜切猕猴桃片的脆性、色差、VC 含量的货架期预测模型对贮藏在  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下试验数据的预测效果。由表 5 可知,  $SL_{\text{色差}}$ 、 $SL_{\text{脆性}}$  和  $SL_{\text{VC}}$  货架期预测模型对试验数据的相对误差分别为 3.41%、4.03%、2.4%, 均小于 5%, 其中  $SL_{\text{VC}}$  货架期预测模型效果最好。

#### 3.2 菌落总数货架期预测模型的检验

准确因子  $A_i$  和偏差因子  $B_i$  可以评价 Logistics 方程对鲜切猕猴桃片菌落总数的拟合效果。表 6 为菌落总数货架期预测模型对  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  贮藏条件下的  $N_{\text{实测}}$  与  $N_{\text{预测}}$  的比较, 根据表中数据计算得到准确因子  $A_i$ <sup>[26]</sup> 和偏差因子  $B_i$ <sup>[27]</sup> 分别为 1.3, 1.05。可见, Logistics 变形模型对鲜切猕猴桃片菌落总数

表 5  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  下鲜切猕猴桃片货架期的实测值与预测值

Table 5 Measured and predicted shelf life of fresh-cut kiwi slices at  $3 \text{ }^\circ\text{C}$

指标	预测值/d	实测值/d	相对误差/%
色差	13.0390	13.5	3.41
脆性	12.9563	13.5	4.03
VC	13.1761	13.5	2.40
菌落	15.4211	15.0	2.80

生长曲线的拟合效果好, 可用于经等离子体处理后鲜切猕猴桃片菌落总数的预测。

将鲜切猕猴桃片的贮藏温度  $T=3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、等离子体杀菌后的初始菌落总数  $N_0=2.050 \lg(\text{CFU/g})$  代入式(22), 可计算出  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  下鲜切猕猴桃片货架期的预测值, 结果见表 5。可知,  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  下鲜切猕猴桃片货架期的预测值与实测值的相对误差为 2.8%, 小于 5%, 预测效果好, 可用于预测经等离子体处理后

表6 3℃下鲜切猕猴桃片菌落总数的模型预测值与实测值  
Table 6 Measured and predicted total colony of fresh-cut kiwi slices at 3℃

贮藏时间/d	预测值/ $\lg(\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1})$	实测值/ $\lg(\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1})$	$N_{\text{预测}}-N_{\text{实测}}$	$ N_{\text{预测}}-N_{\text{实测}} $
0	2.4299	2.3010	0.1289	0.1289
3	3.3274	3.2305	0.0969	0.0969
6	4.2477	4.4533	-0.2056	0.2056
9	5.0702	4.9823	0.0879	0.0879
12	5.7198	5.6178	0.1020	0.1020
15	6.1845	6.2625	-0.0780	0.0780

鲜切猕猴桃片的货架期。由表可知,基于鲜切猕猴桃片品质指标的货架期实测值为 13.5 d, 小于基于菌落总数的货架期实测值 15.0 d, 这可能是由于等离子体中的电子、离子、臭氧、紫外线以及活性粒子的杀菌作用及抑制细胞呼吸作用延缓了鲜切猕猴桃片的腐败, 使得鲜切猕猴桃片开始腐败的时间滞后于达到感官拒绝点时间, 因此, 基于鲜切猕猴桃片菌落总数测定的货架期较长。

#### 4 结论

随着贮藏时间的延长, 等离子体处理后的鲜切猕猴桃片的固酸比、总酚及叶绿素含量变化不显著( $P>0.05$ ), 色差、菌落总数显著增加, 脆性、VC 含量显著下降, 且随着贮藏温度升高, 变化速率增大; 色差、脆性、菌落总数及 VC 含量可作为鲜切猕猴桃片货架期预测模型的监测指标。零级反应方程对鲜切猕猴桃片的色差变化的拟合效果最好, 平均拟合度为 0.93864, 一级反应方程对脆性、VC 含量变化的拟合效果最好, 平均拟合度分别为 0.96248, 0.97074; 建立的基于脆性、色差、VC 含量的鲜切猕猴桃片的货架期预测模型  $SL_{\text{脆性}}$ 、 $SL_{\text{色差}}$ 、 $SL_{\text{VC}}$  对测试数据的预测值与实测值的相对误差分别为 4.03%, 3.05%, 2.4%, 可以有效预测 0~25℃贮藏条件下鲜切猕猴桃片的货架期。Logistics 变形方程对鲜切猕猴桃片菌落总数变化的拟合效果最好, 平均拟合度为 0.97900, 建立的鲜切猕猴桃片菌落总数货架期预测模型  $SL_{\text{菌落}}$  的准确因子为 1.30, 偏差因子为 1.05, 模型对测试数据的相对误差为 2.8%, 可有效预测 0~25℃贮藏条件下鲜切猕猴桃片的货架期。

#### 参 考 文 献

- [1] 李加兴, 孙金玉, 陈双平, 等. 猕猴桃综合加工利用[J]. 食品科学, 2006, 27(11): 575-578.  
LI J X, SUN J Y, CHEN S P, et al. Kiwi fruit comprehensive processing utility [J]. Food Science, 2006, 27(11): 575-578.
- [2] CARR A C, BOZONET S M, PULLAR J M, et al. Mood improvement in young adult males following supplementation with gold kiwifruit, a high-vitamin C food[J]. Journal of Nutritional Science, 2013, 2(12): E24.
- [3] DU G, LI M, MA F, et al. Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and VC in *Actinidia* fruits[J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 557-562.
- [4] TAVARINI S, ELENA D I, REMORINI D, et al. Antioxidant capacity, ascorbic acid, total phenols and carotenoids changes during harvest and after storage of Hayward kiwifruit[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 282-288.
- [5] 周会玲. 鲜切果蔬的加工与保鲜技术[J]. 食品科学, 2001, 22(8): 82-83.  
ZHOU H L. Processing and preservation technology of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food Science, 2001, 22(8): 82-83.
- [6] 郑亚男, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 鲜切果蔬对机械伤害的响应及其调控的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 380-386.  
ZHENG Y N, HU W Z, JIANG A L, et al. Research progress in response of mechanical wounding and regulation for fresh-cut fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(15): 380-386.
- [7] 马杰, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬活性氧产生和抗



- 氧化体系代谢的研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(7): 316-320.
- MA J, HU W Z, BI Y, et al. Advances in active oxygen generation and antioxidant system of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food Science, 2013, 34(7): 316-320.
- [8] TAPPI S, BERARDINELLI A, RAGNI L, et al. Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 21: 114-122.
- [9] DRAGOVIĆUZELAC V, JAMBRAK A R, KLJUSURIĆ J G, et al. Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice[J]. Food Chemistry, 2016, 190(1): 665-672.
- [10] MCMEEKIN T A, BARANYI J, BOWMAN J, et al. Information systems in food safety management [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 112(3): 181-194.
- [11] 史波林, 赵镭, 支瑞聪. 基于品质衰变理论的食品货架期预测模型及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(21): 345-350.
- SHI B L, ZHAO L, ZHI R C. Advances in predictive shelf life models based on food quality deterioration theory and their applications[J]. Food Science, 2012, 33(21): 345-350.
- [12] 蒋军, 周庆伍, 李安军, 等. 茶香型苹果酒发酵特征及其动力学模型[J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 134-138.
- JIANG J, ZHOU Q W, LI A J, et al. Fermentation characters and kinetic models of tea-flavor cider[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(15): 134-138.
- [13] DUYVESTYEN W S, SHIMONI E, LABUZA T P. Determination of the end of shelf-life for milk using Weibull hazard method[J]. LWT - Food Science and Technology, 2001, 34(3): 143-148.
- [14] ZWIETERING M, JONGENBURGER I, ROMBOUTS F, et al. Modeling of the bacterial growth curve[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(6): 1875-1881.
- [15] 肖璐, 范新光, 王美兰, 等. 基于预报微生物学理论的鲜切西兰花货架期预测模型[J]. 中国食品学报, 2014, 14(9): 141-146.
- XIAO L, FAN X G, WANG M L, et al. Shelf-life prediction model of fresh-cut broccoli based on predictive microbiology theory [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(9): 141-146.
- [16] 张利平, 谢晶. Arrhenius 方程结合特征指标在蔬菜货架期预测中的应用[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 163-168.
- ZHANG L P, XIE J. Application of Arrhenius model combined special quality index in shelf life prediction of vegetable[J]. Food and Machinery, 2012, 28(5): 163-168.
- [17] 金鑫, 禹迎迎, 吴菊清, 等. 大肠杆菌和假单胞菌在猪背最长肌上混合预测模型的建立[J]. 食品科学, 2013, 34(17): 87-91.
- JIN X, YU Y Y, WU J Q, et al. Predictive modeling of simultaneous growth of *Escherichia coli* and *Pseudomonas* spp. in inoculated pork longissimus dorsi muscle[J]. Food Science, 2013, 34(17): 87-91.
- [18] 张文, 梁怡蕾, 吴晨阳, 等. 梨质地变化规律与动力学模型[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 9-14.
- ZHANG W, LIANG Y L, WU C Y, et al. Kinetic analysis and modelling of changes in the texture of pear fruit during postharvest storage [J]. Food Science, 2019, 40(7): 9-14.
- [19] 高灿灿, 刘佳玫, 陆兆新, 等. 鲜切小白菜和生菜不同贮藏温度下货架期预测模型的建立[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 334-338.
- GAO C C, LIU J M, LU Z X, et al. Quality changes and construction of shelf life prediction model about microbial of fresh-cut leafy vegetables [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(19): 334-338.
- [20] 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 W X, DING T, LIU D H. Building shelf-life prediction models of postharvest strawberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(3): 186-193.
- [21] 雷昊, 谢晶, 乔永祥. 臭氧水处理后的鲜切杭白菜货架期模型的建立与评价[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 118-121.
- LEI H, XIE J, QIAO Y X. Establishment and evaluation of shelf life model on fresh cut Hang cabbage processed by ozone water[J]. Food and Machinery, 2017, 33(8): 118-121.

- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-9.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of ascorbic acid in food: GB 5009.86-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-9.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中总酸的测定: GB/T 12456-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-5.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of total acid in foods: GB 5009.86-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 1-5.
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-5.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Food microbiology test-Determination of aerobic plate count: GB 4789.2-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-5.
- [25] 王虎玄, 代春吉, 孙宏民, 等. 鲜切猕猴桃片冷藏过程中优势腐败细菌的分离鉴定[J]. 陕西科技大学学报, 2019, 37(1): 37-42.  
WANG H X, DAI C J, SUN H M, et al. Characterization of dominant spoilage bacteria from fresh-cut kiwi fruit with cold storage[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2019, 37(1): 37-42.
- [26] 董庆利, 曾静, 丁甜, 等. 猪肉中气单胞菌生长与失活的 Gompertz 模型构建[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 118-122.  
DONG Q L, ZENG J, DING T, et al. Establishment of Gompertz model for the growth and inactivation of *Aeromonas* spp. in pork[J]. Food Science, 2011, 32(11): 118-122.
- [27] 傅鹏, 李平兰, 周康, 等. 冷却肉中假单胞菌温度预测模型的建立与验证[J]. 农业工程学报, 2008(4): 229-234.  
FU P, LI P L, ZHOU K, et al. Development of models to predict the growth of *Pseudomonas* isolated from chilling pork[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(4): 229-234.

## Shelf Life Prediction Model of Fresh-cut Kiwifruit Slices Treated with Low-temperature Plasma

Chen Yueyuan, Zhao Wuqi\*, Jia Mengke, Gao Guitian, Zhang Qingan, Meng Yonghong  
(Shaanxi Normal University, College of Food Engineering and Nutritional Science, Xi'an 710119)

**Abstract** The effect of storage temperature on the quality indexes and total number of colonies of fresh-cut kiwifruit slices treated with low-temperature plasma were studied, and the shelf life prediction models of quality indexes and total number of colonies were established. The fresh-cut kiwifruit slices treated with low-temperature plasma were stored at 0, 5, 10, 15, 20, 25 °C, and the VC content, chlorophyll content, total phenol content, total colony count, brittleness, color aberrations and solid-acid ratio were measured regularly. The effect of different temperatures on the quality indexes and the total number of colonies were explored. The fitting equations of monitoring indexes were determined. The shelf life prediction models of the quality indexes and the total number of colonies of fresh-cut kiwifruit slices were established by combining the Arrhenius model and the Belehradck model. The results show that the storage temperature has no significant effect on the solid-acid ratio, total phenol content and chlorophyll content, while the storage temperature has significant effect on color aberration, brittleness, VC content and total colony count. The changes of VC content, brittleness, color aberration and total colony count of fresh-cut kiwifruit slices treated with low-temperature plasma follow the first-order reaction, first-order reaction, zero-order reaction and Logistics equation models respectively during storage. The shelf life prediction models ( $SL_{\text{brittleness}}$ ,  $SL_{\text{color aberration}}$ ,  $SL_{\text{VC}}$ ,  $SL_{\text{colony}}$ ) of fresh-cut kiwifruit slices quality index and total bacterial colonies was effective. The relative errors of the shelf life prediction models were 4.03%, 3.41%, 2.4% and 2.8% respectively under the storage condition of 3 °C. The models can be used to predict the shelf life of fresh-cut kiwifruit slices treated with low-temperature plasma under 0-25 °C storage conditions.

**Keywords** fresh-cut kiwifruit slices; shelf life prediction model; low temperature plasma