

吴海燕, 施晓玲, 袁秋梅. 烫漂过程中芥菜过氧化物酶失活动力学模型研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 67-73. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060096

WU Haiyan, SHI Xiaoling, YUAN Qiumei. Kinetic Models of Peroxidase Inactivation in *Capsella bursa-pastoris* during Blanching[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 67-73. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060096

· 研究与探讨 ·

# 烫漂过程中芥菜过氧化物酶失活动力学模型研究

吴海燕<sup>1,2</sup>, 施晓玲<sup>3</sup>, 袁秋梅<sup>1,2</sup>

(1.南通科技职业学院, 江苏南通 226007;

2.南通市农业生物技术重点实验室, 江苏南通 226007;

3.南通市食品药品监督检验中心, 江苏南通 226006)

**摘要:** 采用一级动力学模型、Weibull 分布模型、Logistic 模型对芥菜烫漂过程中过氧化物酶失活动力学模型进行拟合。以决定系数 ( $R^2$ )、卡方 ( $\chi^2$ )、均方根误差 (RMSE)、精确因子 ( $A_f$ )、偏差因子 ( $B_f$ ) 等为评价指标, 分析模型的拟合效果。利用模型预测不同烫漂温度的烫漂工艺条件, 同时以维生素 C 的含量为指标, 评价不同烫漂工艺对维生素 C 含量的影响。结果表明: Logistic 模型拟合烫漂过程中芥菜过氧化物酶失活动力学效果好, 拟合精度高, 拟合值与实测值偏差小, 其决定系数  $R^2$  为 0.9980,  $\chi^2$  为  $0.96 \times 10^{-4}$ , RMSE 为 0.0097,  $A_f$  为 1.1304,  $B_f$  为 1.0070。在过氧化物酶 95% 失活的条件下, 依据 Logistic 模型预测, 100 °C 下烫漂 20 s, 80 °C 下烫漂 287 s, POD 相对酶活在 0.050±0.001 之间; 烫漂后维生素 C 含量也存在显著性差异, 高温短时烫漂后的维生素 C 损失较少。POD 失活动力学模型预测烫漂工艺条件, 可以减少维生素 C 等热敏性营养成分损失。

**关键词:** 芥菜, 过氧化物酶, 烫漂, 动力学模型

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)05-0067-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060096



本文网刊:

## Kinetic Models of Peroxidase Inactivation in *Capsella bursa-pastoris* during Blanching

WU Haiyan<sup>1,2</sup>, SHI Xiaoling<sup>3</sup>, YUAN Qiumei<sup>1,2</sup>

(1.Nantong College of Science and Technology, Nantong 226007, China;

2.Nantong Key Laboratories of Agrobiotechnology, Nantong 226007, China;

3.Nantong Food and Drug Supervision and Inspection Center, Nantong 226006, China)

**Abstract:** The inactivation kinetic of peroxidase in *Capsella bursa-pastoris* during blanching was evaluated using first-order, Weibull, and Logistic models. The goodness-of-fit of the three tested models was assessed using the coefficient of determination ( $R^2$ ), chi-square ( $\chi^2$ ), root mean square error (RMSE), accuracy factor ( $A_f$ ), bias factor ( $B_f$ ). Moreover, the best goodness-of-fit model was used to predict the blanching process according to the content of vitamin C. The results indicated that the Logistic model was most suitable than other models for predicting POD inactivation. The performance of the Logistic model indicated a strong fit by the high coefficient of determination ( $R^2=0.9980$ ) and low prediction error ( $\chi^2=0.96 \times 10^{-4}$ , RMSE=0.0097,  $A_f=1.1304$ ,  $B_f=1.0070$ ). While the blanching inactivated 95% peroxidase activity in *Capsella bursa-pastoris*, the relative enzyme activity of POD was 0.050±0.001 after blanching at 100 °C for 20 s and 80 °C for 287 s according to Logistic model. There was a significant difference in vitamin C content after blanching, high-temperature-short-time blanching could reduce the loss of vitamin C. The inactivation kinetic model of POD can predict the blanching process conditions, which can reduce the loss of heat-sensitive nutrients such as vitamin C.

收稿日期: 2022-06-13

基金项目: 南通市社会民生科技项目 (MS12020058)。

作者简介: 吴海燕 (1978-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品综合利用与食品安全, E-mail: why022@126.com。

**Key words:** *Capsella bursa-pastoris*; peroxidase; blanching; kinetic model

荠菜是十字花科荠属草本植物,全草均可食用,也可入药<sup>[1]</sup>。荠菜叶嫩根硕,风味独特,且营养丰富<sup>[2-6]</sup>,具有多种保健功效<sup>[7-11]</sup>,深受消费者的喜爱。但是荠菜不耐贮藏,且贮藏期过氧化物酶(POD)活性增强<sup>[12]</sup>,POD能促进荠菜酶促褐变,导致营养成分(如维生素C)的氧化,产生不良风味,进而影响产品风味、色泽、质地等<sup>[13-15]</sup>。荠菜速冻是解决荠菜不耐贮藏的有效方法,其能较好地保持荠菜品质,且货架期长、食用方便。

速冻荠菜预处理工序烫漂可以钝化氧化酶活性,从而抑制酶促褐变;烫漂还影响产品的其他质量属性<sup>[16-19]</sup>,它可以杀死部分微生物,减少微生物初始菌落数量,保证产品品质。SHIN等<sup>[20]</sup>在100℃条件下烫漂荠菜30s可以最大程度减少速冻荠菜品质劣变。POD是果蔬中耐热性最强的酶,果蔬烫漂通常以烫漂后POD相对酶活性作为判断烫漂终点的标准<sup>[21-23]</sup>。程玉静等<sup>[24]</sup>优化荠菜烫漂工艺,确定烫漂终点POD相对酶活在0.03~0.07之间。姜永平等<sup>[25]</sup>优化烫漂荠菜工艺,确定烫漂终点POD相对酶活为0.082。同时热烫也会对荠菜中热敏性营养成分、质地有负面影响<sup>[16]</sup>。维生素C是热不稳定,烫漂后维生素C的保存量可以作为其他营养成分保存情况的指标<sup>[16,26-28]</sup>。康三江等<sup>[21]</sup>研究烫漂对速冻苹果维生素C含量的影响,烫漂后速冻苹果中维生素C的损失为12.16%;不烫漂直接速冻的苹果维生素C的损失为20.13%。

为了探究荠菜烫漂预处理过程中不同烫漂工艺对热敏性营养成分损失的影响,以新鲜散叶荠菜为原料,采用热水烫漂,测定烫漂后POD的相对酶活,研究荠菜POD的失活动力学并建立POD失活动力学模型;通过动力学模型预测烫漂工艺条件,在保证POD酶活性受到抑制的前提下,探讨不同烫漂工艺条件对维生素C损失的影响,以期为荠菜速冻生产实践中如何最大限度减少烫漂对品质的负面影响、尽可能地保护热敏性营养成分提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

荠菜 江苏中宝食品有限公司(荠菜品种为散叶荠菜,2月份整株采收,2h内运回实验室,冰箱4℃冷藏12h进一步实验);维生素C标准品(色谱纯) Sigma公司;草酸、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、双氧水、愈创木酚等试剂(均为分析纯) 国药集团。

TU1901 双通道紫外可见分光光度计 北京通用普析公司;Waters 双通道紫外检测器高效液相色谱仪 Waters公司;BS 124S 电子天平(精确度0.1mg)

Sartorius公司;SL8R 高速冷冻离心机 Thermo公司;HR2084 食品制样器 飞利浦公司;HHS11-8 数显恒温水浴锅 常州金坛精达仪器制造有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 荠菜烫漂 参照程玉静等<sup>[24]</sup>的方法并稍作修改。挑选新鲜无虫害、无抽薹的荠菜,去除泥沙、黄叶,洗净沥干水分。称取一定量的荠菜在一定温度条件下(80、85、90、95、100℃)漂烫一定时间(20、30、40、50、60、70、80、100、120、150、180s),烫漂后POD相对酶活力小于0.10时停止实验<sup>[25]</sup>,漂烫结束后迅速用冰水冷却终止反应,沥干表面水分后再进行下一步实验。

1.2.2 酶液提取 参照程玉静等<sup>[24]</sup>的方法并稍作修改。荠菜放入预冷的研钵中,加入适量0.05 mol/L预冷的磷酸盐缓冲溶液(pH7.0)在冰水浴上研磨成匀浆,转入离心管中在4℃、9000 r/min下离心5 min,上清液转入50 mL的容量瓶,用磷酸盐缓冲溶液(pH7.0)定容,贮存于冰箱。

1.2.3 酶活测定 参照曾韶西等<sup>[29]</sup>的方法并稍作修改。以3 mL磷酸缓冲溶液(pH7.0)作为空白溶液,在比色皿中加入2 mL 0.1%愈创木酚溶液、0.8 mL 0.15%双氧水溶液,迅速加入0.2 mL POD提取液混匀,在470 nm波长处测定POD反应液3 min吸光度变化,以每分钟吸光度变化0.01为1个POD活力单位。

$$\text{POD活力(U/g} \cdot \text{min)} = \frac{\Delta A_{470} \times V_T}{m \times 0.01 \times t \times V_S} \quad \text{式(1)}$$

式中: $\Delta A_{470}$ :POD反应液在波长470 nm处吸光度的变化绝对值;m为样品质量,g;t为3 min; $V_T$ 为提取POD总体积,mL; $V_S$ 为测定时取用POD体积,mL。

POD相对酶活为烫漂后POD残余酶活力 $P_t$ 与初始酶活力 $P_0$ 之比。

1.2.4 维生素C含量测定 采用反相高效液相色谱法测定维生素C的含量,以0.1%草酸为流动相, $C_{18}$ 色谱柱分离,采用紫外检测器检测,外标法定量计算维生素C的含量<sup>[30]</sup>。根据公式(2)计算维生素C的含量。

$$\text{维生素C含量(mg/100 g)} = \frac{c \times V \times 100}{m \times 1000} \quad \text{式(2)}$$

式中:c为待测荠菜的维生素C浓度, $\mu\text{g/mL}$ ;V为样品定容的体积,mL;m荠菜的质量,g。

### 1.2.5 动力学模型

1.2.5.1 一级动力学模型 一级动力学模型是酶失活动力学特性研究中最常用的模型,模型假设酶结构中某一化学键破坏导致酶的失活,研究反应速率常数与酶活性的动力学关系<sup>[26-27]</sup>。根据公式(3)计算荠菜烫漂POD失活动力学参数。

$$\frac{P_t}{P_0} = e^{-kt} \quad \text{式(3)}$$

式中:  $P_t$  为芥菜烫漂  $t$  秒后 POD 活力,  $U/g \cdot \min$ ;  $P_0$  为未烫漂芥菜的 POD 活力,  $U/g \cdot \min$ ;  $k$  为反应速率常数,  $s^{-1}$ ;  $t$  烫漂时间,  $s$ 。

1.2.5.2 Weibull 分布模型 Weibull 分布模型已经成功应用于食品加热干燥、烫漂过程模拟<sup>[28]</sup>。根据公式(4)Weibull 分布模型累积函数模拟芥菜的烫漂 POD 失活参数。

$$\frac{P_t}{P_0} = e^{-bt^n} \quad \text{式 (4)}$$

式中:  $t$  烫漂时间,  $s$ ;  $b, n$  是与温度有关的参数;  $n$  决定  $\ln \frac{P_t}{P_0}$  对  $t$  的函数图像形状,  $n > 1$ , 函数图像向上凸;  $n < 1$ , 函数图像向下凸;  $n = 1$ , 函数图像是直线;  $n$  在一定温度范围内, 受温度影响小, 可以近似认为是常数。

1.2.5.3 Logistic 模型 Logistic 模型已被应用于多酚氧化酶(PPO)残存酶活性<sup>[15]</sup>。根据公式(5)模拟芥菜的烫漂 POD 失活参数。

$$\frac{P_t}{P_0} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{1 + \left(\frac{t}{t_{50}}\right)^\delta} + A_{\min} \quad \text{式 (5)}$$

式中:  $t$  烫漂时间,  $s$ ;  $t_{50}$  是 POD 相对酶活为 0.50 时所需的烫漂时间,  $s$ ;  $\delta$  是曲线参数;  $A_{\max}$  是  $\frac{P_t}{P_0}$  最大值;  $A_{\min}$  是  $\frac{P_t}{P_0}$  最小值;  $\frac{P_t}{P_0}$  最大值为 1, 最小值为 0, 公式(5)就可以简化为  $\frac{P_t}{P_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{t_{50}}\right)^\delta}$ 。

1.2.5.4 模型拟合度的评价 利用决定系数( $R^2$ )、卡方( $\chi^2$ )、均方根误差(RMSE)来评价模型拟合度。 $R^2$  越接近 1,  $\chi^2$ 、RMSE 越小, 模型的拟合度越好<sup>[31]</sup>。精确因子( $A_f$ )、偏差因子( $B_f$ )来评价模型预测值的准确性。 $A_f$  始终  $\geq 1$ , 当  $A_f = 1$  表明所有预测值与实验值均相等,  $A_f$  越接近于 1, 预测值与实验值越接近, 模型的精确度越高;  $B_f > 1$ , 实验值大于预测值,  $B_f = 1$ , 实验值等于预测值,  $B_f < 1$ , 实验值小于预测值,  $B_f$  越接近 1, 模型预测偏差越小, 结果越可靠<sup>[15]</sup>。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{mi} - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_m - Y_i)^2} \quad \text{式 (6)}$$

$$\chi^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{mi} - Y_i)^2}{N - n} \quad \text{式 (7)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{mi} - Y_i)^2}{N}} \quad \text{式 (8)}$$

$$A_f = 10 \frac{\sum \left| \lg \frac{Y_{mi}}{Y_i} \right|}{N} \quad \text{式 (9)}$$

$$B_f = 10 \frac{\sum \lg \frac{Y_{mi}}{Y_i}}{N} \quad \text{式 (10)}$$

式中:  $Y_{mi}$  和  $Y_i$  分别为模型拟合和实验测得  $\frac{P_t}{P_0}$  值;  $N$  为某一温度下烫漂实验次数;  $n$  为模型考察的参数个数。

### 1.3 数据处理

每个实验都平行重复 3 次, 实验结果以平均值  $\pm$  标准偏差表示。使用软件 Excel 2010、Origin 2022 处理实验数据并绘图; 使用软件 Excel 2010 进行差异显著性分析, 显著性水平  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 新鲜芥菜的 POD 酶活力与维生素 C 含量

POD 初始酶活力为  $(3695.67 \pm 31.86) U/g \cdot \min$ ; 新鲜芥菜的维生素 C 含量为  $(54.88 \pm 0.22) mg/100 g$ 。

### 2.2 POD 失活特性

烫漂温度、时间是相对酶活的重要影响因素。80 °C 条件下烫漂 180 s POD 相对酶活为 0.0957, 而 100 °C 条件下烫漂 20 s POD 相对酶活为 0.0505。在不同烫漂温度下, POD 相对酶活对烫漂时间( $t$ )作图, 实验结果如图 1 所示。

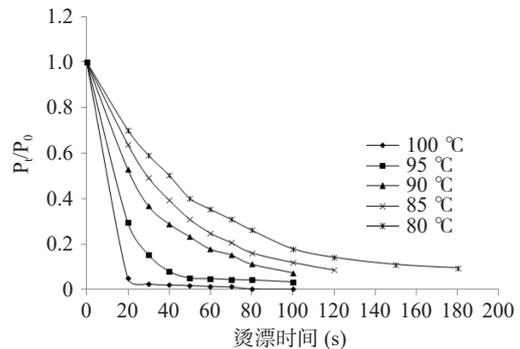


图 1 漂烫温度和时间对 POD 活力的影响  
Fig.1 Effect of blanching temperature and time on the activities of POD

烫漂温度、时间对 POD 相对酶活影响与 POD 的结构有关<sup>[32-33]</sup>, POD 是一类氧化还原酶, 在同一样品中, POD 表现不同耐热性, 有些 POD 与碳水化合物结合, 以糖基化蛋白酶形式存在, 有较高的耐热性<sup>[28]</sup>。图 1 中同一烫漂时间, POD 相对酶活随着烫漂温度升高而降低。同一烫漂温度, 起始阶段相对酶活随烫漂时间延长迅速下降, 温度越高, 下降速度越快; 随着烫漂时间延长, 相对酶活最终趋向平缓。这是因为同一烫漂时间, 温度越高, POD 酶蛋白越容易与辅基分离, 酶蛋白越容易失活。同一烫漂温度, 起始阶段游离 POD 酶迅速失活, 中间过渡区域则是不同耐热性的 POD 同工酶表现出来的活性, 最终平缓阶段代表少量耐热 POD 有活性。

### 2.3 酶失活模型

分别用一级动力学模型、Weibull 分布模型、Logistic 模型拟合芥菜烫漂中 POD 失活情况, 以

POD 相对酶活( $P_t/P_0$ )对烫漂时间( $t$ )作图, 模拟值与实验值对比如图 2~图 4 所示。模型相关参数见表 1。

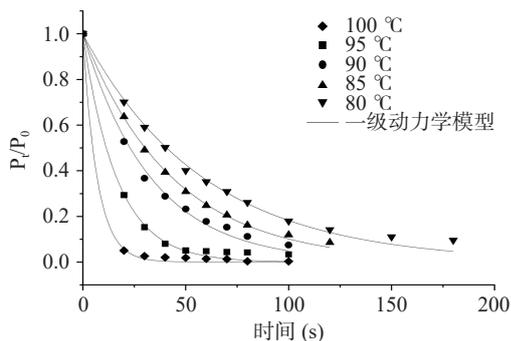


图 2 一级动力学模型 POD 活性预测值与实验值

Fig.2 The predicted values by the first-order kinetic model and experimental values of POD activity

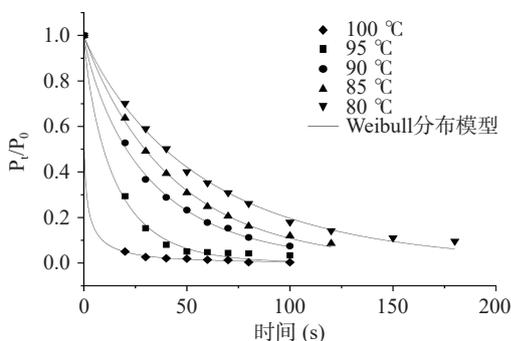


图 3 Weibull 分布模型 POD 活性预测值与实验值

Fig.3 The predicted values by the Weibull distribution model and experimental values of POD activity

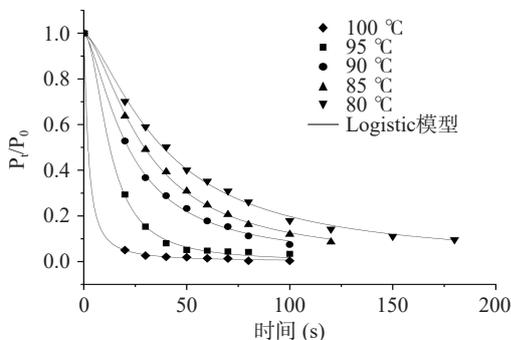


图 4 Logistic 模型 POD 活性预测值与实验值

Fig.4 The predicted values by the Logistic model and experimental values of POD activity

由图 2~图 4 拟合曲线可以看出, 三个模型能对 POD 失活动力曲线进行拟合。由表 1 可知三个模型的  $R^2 > 0.99$ , 说明三个模型能解释 99% 以上实验数据的变异性。为进一步比较三个模型的可靠性, 将实验值与模型预测值散点分布进行比较, 衡量模型预测值和实测值是否一致, 结果见图 5~图 10。

从模型的分布图可以看出, 一级动力学模型预测值的残差散点分布在零值线的  $\pm 0.04$  范围内, Weibull 分布模型和 Logistic 模型预测值的残差散点分布在零值线的  $\pm 0.006$  范围内。残差散点分布越接近零值线, 预测的准确性越好<sup>[25]</sup>, 因此 Weibull 分布模型和 Logistic 模型预测值准确性要高于一级动力学模

表 1 烫漂过程 POD 失活动力学模型参数

Table 1 Results on the parameters of the models fitted to inactivation kinetics of POD enzymes

模型	参数	温度(°C)				
		100	95	90	85	80
一级动力学	$k(s^{-1})$	0.14261	0.06061	0.03015	0.02290	0.01702
	$R^2$	0.99855	0.99534	0.99353	0.99835	0.99431
	$x^2(\times 10^{-4})$	1.55270	4.58211	5.40682	1.31361	4.22113
	RMSE	0.01174	0.02019	0.02193	0.01086	0.01966
	$b(s^{-n})$	1.07403	0.10453	0.05246	0.02699	0.02419
Weibull分布	$n$	0.34537	0.83644	0.85189	0.95784	0.91408
	$R^2$	0.99990	0.99602	0.99844	0.99872	0.99661
	$x^2(\times 10^{-4})$	0.10502	3.91630	1.30694	1.01958	2.51597
	RMSE	0.00286	0.01745	0.01008	0.00903	0.01449
	$t_{50}(s)$	2.13329	12.6434	21.5390	29.4027	38.4014
Logistic	$\delta$	1.31881	1.96486	1.50881	1.57949	1.46365
	$R^2$	0.99990	0.99851	0.99877	0.99906	0.99757
	$x^2(\times 10^{-4})$	0.10405	1.46539	1.03061	0.74749	1.80041
	RMSE	0.00285	0.01070	0.00895	0.00773	0.01225

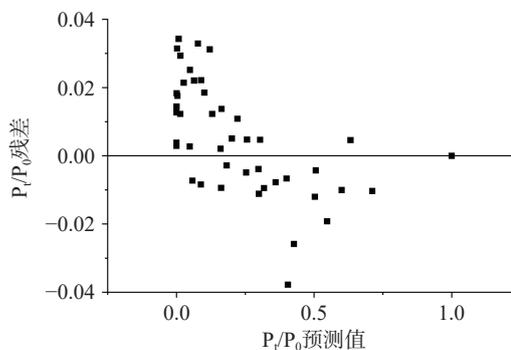


图 5 一级动力学模型残差值和预测值的分布图

Fig.5 Distribution of residual and predicted values from first-order kinetic model

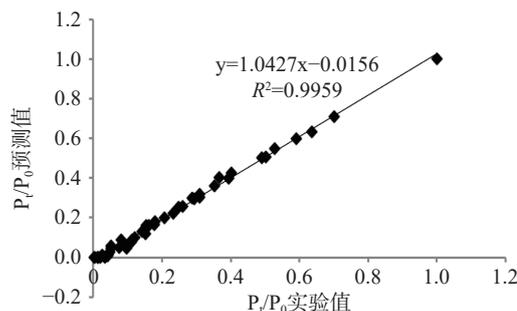


图 6 一级动力学模型预测值和实验值的分布图

Fig.6 Distribution of predicted and measured values from first-order kinetic model

型。一级动力学模型实际上是 Weibull 分布模型中参数  $n=1$  的一种特殊情形, 且该模型的假设 POD 一级结构破坏就失活, 忽略 POD 酶本身结构的复杂性, 导致预测结果残差值偏大。以同一模型预测值对实验值进行直线回归, 直线回归结果评价见表 2。

由表 2 可知, Logistic 模型的  $A_f$ 、 $B_f$  比一级动力学模型、Weibull 分布模型更接近 1, 其模型的  $x^2$ 、RMSE 最小, 说明 Logistic 模型预测值与实测值最接近<sup>[15]</sup>; Logistic 模型预测值对实验值回归方程的决定

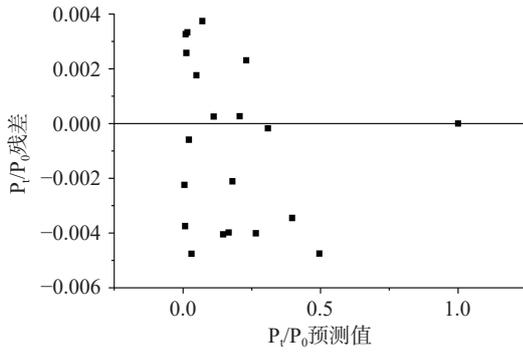


图 7 Weibull 分布模型残差值和预测值的分布图  
Fig.7 Distribution of residual and predicted values from Weibull distribution model

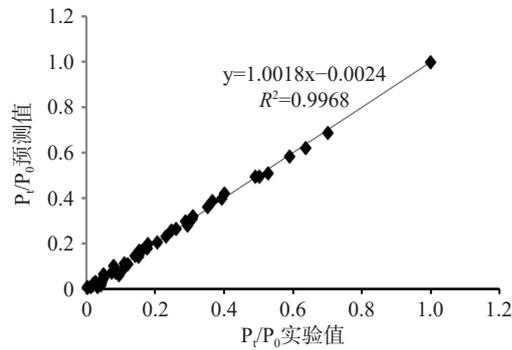


图 8 Weibull 分布模型预测值和实验值的分布图  
Fig.8 Distribution of predicted and measured values from Weibull distribution model

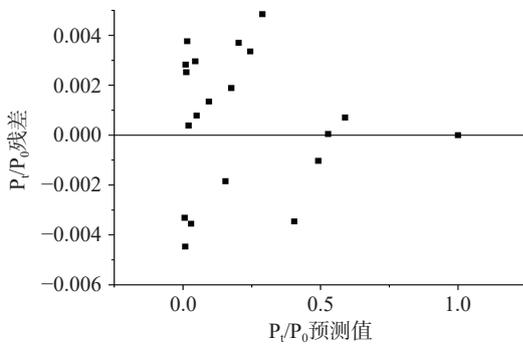


图 9 Logistic 模型残差值和预测值的分布图  
Fig.9 Distribution of residual and predicted values from Logistic model

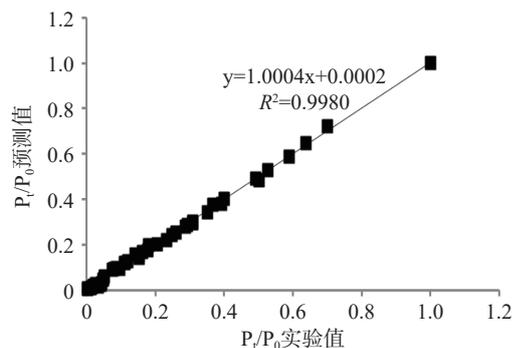


图 10 Logistic 模型预测值和实验值的分布图  
Fig.10 Distribution of predicted and measured values from Logistic model

表 2 模型评价参数比较

Table 2 Comparison of the evaluation parameters of models

模型	拟合方程	$A_f$	$B_f$	$x^2(\times 10^{-4})$	RMSE	$R^2$
一级动力学	$y=1.0427x-0.0156$	2.3999	0.4300	3.50	0.0183	0.9959
Weibull分布	$y=1.0018x-0.0024$	1.1797	0.9423	1.64	0.0125	0.9968
Logistic	$y=1.0004x+0.0002$	1.1304	1.0070	0.96	0.0097	0.9980

系数为 0.9980, 大于一级动力学模型和 Weibull 分布模型, 表明 Logistic 模型可靠性优于其他模型, 能更好拟合芥菜烫漂中 POD 酶失活的动力学曲线。

### 2.4 模型应用

热烫会导致蔬菜中水溶性营养成分和热敏性营养成分损失<sup>[16]</sup>, 黄晓杰等<sup>[27]</sup>研究发现漂烫时间越长, 水溶维生素 C 损失越多, 维生素 C 损失受时间因素影响要比温度影响大。烫漂会导致芥菜中维生素 C 发生损失, 但是烫漂也是速冻芥菜钝化 POD 酶活性、防止氧化褐变, 保存维生素 C 含量的有效方法。研究表明, 蔬菜烫漂终止时保留一定 POD 活性, 产品品质反而更好<sup>[23,28]</sup>; 各种速冻蔬菜获得最佳品质的条件是烫漂后 POD 相对酶活不超过 0.10<sup>[16]</sup>, 以 0.05 左右为宜<sup>[34-36]</sup>。根据 Logistic 模型, 预测 80~100 °C 烫漂, 芥菜 POD 相对酶活在 0.05 水平需要的烫漂时间, 为了便于实验, 烫漂时间取整数, 测定烫漂后芥菜中 POD 相对酶活和维生素 C 的含量, 结果见表 3。

表 3 POD 相对酶活为 0.05 条件下的不同烫漂条件及维生素 C 含量

Table 3 Blanching conditions under the 0.05 relative enzyme activity of POD in *Capsella bursa-pastoris* and corresponding vitamin C contents

温度 (°C)	预测烫漂时间(t)	实际烫漂时间(t)	$P_t/P_0$	维生素C含量 (mg/100 g)
100	19.89192	20	0.04979	47.62±0.11 <sup>a</sup>
95	56.58163	57	0.04997	44.59±0.29 <sup>b</sup>
90	151.6178	152	0.05014	41.41±0.33 <sup>c</sup>
85	189.6646	190	0.04970	34.20±0.22 <sup>d</sup>
80	287.0923	287	0.05018	32.09±0.26 <sup>e</sup>

注: 维生素C含量数据列中不同字母表示经单因素方差分析, 不同样本差异显著,  $P<0.05$ 。

由表 3 可知, 依据 Logistic 模型预测不同温度下烫漂时间, POD 相对酶活在 0.050±0.001 之间, 验证了模型预测的准确性。在 POD 相对酶活 0.05 水平下, 温度越高所需要的烫漂时间越短, 100 °C 下需烫漂 20 s, 而 80 °C 下则需烫漂 287 s。烫漂后维生素 C 含量也存在显著性差异 ( $P<0.05$ ), 100 °C 下烫漂 20 s 后, 维生素 C 含量 47.62±0.11 mg/100 g; 80 °C 下烫漂 287 s, 维生素 C 含量 32.09±0.26 mg/100 g, 高温短时烫漂维生素 C 损失较少, 这与 AGÜERO 等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。通过动力学模型预测烫漂工艺条件, 可以确保在钝化 POD 酶活性的提前下减少维生素 C 等热敏性营养成分损失。

### 3 结论

利用一级动力学模型、Weibull 分布累积形式、

Logistic 模型对 POD 失活动力学进行拟合,三个模型决定系数  $R^2 > 0.99$ 。通过对三个模型预测值与实验值比较,Logistic 模型的  $A_f$  最接近 1,预测值与真实值最接近,因此三个模型中 Logistic 模型拟合 POD 失活动力学效果最好。Logistic 模型决定系数  $R^2$  为 0.9980,  $x^2$  为  $0.96 \times 10^{-4}$ , RMSE 为 0.0097,  $A_f$  为 1.1304,  $B_f$  为 1.0070, Logistic 模型拟合精度高,预测值准确度高。

依据 Logistic 模型预测,100 °C 下烫漂 20 s,80 °C 下烫漂 287 s,POD 相对酶活在 0.050±0.001 之间;烫漂后维生素 C 含量也存在显著性差异,高温短时烫漂后的维生素 C 损失较少。烫漂过程 POD 失活动力学模型预测烫漂工艺条件,可以减少烫漂对产品热敏性营养成分损失,为芥菜速冻生产实践中烫漂如何最大限度减少对品质的负面影响提供实践指导;同时也为其他蔬菜烫漂提供模型拟合的理论参考。

### 参考文献

- [1] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草(第三册)[M]. 上海: 科学技术出版社, 1999: 697. [Editorial Board of Chinese Materia Medica. Chinese materia medica (Volume III) [M]. Shanghai: Science & Technical Publishers, 1999: 697.]
- [2] ALSNAFI A E. The chemical constituents and pharmacological effects of *Capsella bursa-pastoris*-A review[J]. International Journal of Pharmacology & Toxicology, 2015, 5(2): 76-81.
- [3] 赵鹤, 夏烟, 陈希鹏, 等. 高寒地区野菜资源营养成分分析[J]. 食品安全导刊, 2021(22): 115-116. [ZHAO H, XIA X, CHEN X P, et al. Nutrient analysis of wild vegetable resources in alpine region[J]. China Food Safety Magazine, 2021(22): 115-116.]
- [4] IQRA R, YAMIN B, NABEELA A, et al. Evaluation of nutritional, phytochemical, antioxidant and cytotoxic potential of *Capsella bursa-pastoris*, a wild vegetable from potohar region of Pakistan[J]. Kuwait Journal of Science, 2022, 48(3): 1-11.
- [5] GROSSO C, VINHOLES J, SILVA L R, et al. Chemical composition and biological screening of *Capsella bursa-pastoris* [J]. International Journal of Pharmacology and toxicology, 2011, 21(4): 635-643.
- [6] 曹小燕, 杨海涛. 响应面法优化超声辅助提取芥菜多酚工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2019(2): 223-232. [CAO X Y, YANG H T. Optimization of ultrasonic assisted extraction technology of polyphenol by response surface methodology from *Capsella bursa-pastoris* and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019(2): 223-232.]
- [7] XIE L K, XU X J, WU X, et al. *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic. extract alleviate cataract development by regulating the mitochondrial apoptotic pathway of the lens epithelial cells[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2022, 284(10): 114783.
- [8] PENG J M, HU T Y, LI J, et al. Shepherd's purse polyphenols exert its anti-inflammatory and antioxidative effects associated with suppressing MAPK and NF- $\kappa$ B pathways and heme oxygenase-1 activation[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019, 2019(3): 1-14.
- [9] YILDIRIM B A, AYDIN T, KORDALI S, et al. Antihemorrhoidal activity of organic acids of *Capsella bursa-pastoris* on croton oil-induced hemorrhoid in rats[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(9): 1-10.
- [10] HWANG J T, CHOI E, CHOI H K, et al. The cholesterol-lowering effect of *Capsella bursa-pastoris* is mediated via SREBP2 and HNF-1 $\alpha$ -regulated PCSK9 inhibition in obese mice and HepG2 cells[J]. Foods, 2021, 10(2): 1-14.
- [11] LU Y, WU Y, CHEN X, et al. Water extract of shepherd's purse prevents high-fructose induced-liver injury by regulating glucolipid metabolism and gut microbiota[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 1-11.
- [12] 孙灵湘, 杨代凤, 刘腾飞, 等. 芥菜贮藏特性及贮藏技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20): 32-34, 42. [SUN L X, YANG D F, LIU T F, et al. Advance of research on storage of *Capsella bursa-pastoris* and its storage characteristics[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(20): 32-34, 42.]
- [13] CHENG L N, WU W J, AN K J, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry[J]. Crystals, 2020, 10(5): 368-383.
- [14] HADIDI M, IBARZ A, CONDE J, et al. Optimisation of steam blanching on enzymatic activity, color and protein degradation of alfalfa (*Medicago sativa*) to improve some quality characteristics of its edible protein[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 591-598.
- [15] DONG S S, FAN L M, MA Y F, et al. Inactivation of polyphenol oxidase by dielectric barrier discharge (DBD) plasma: Kinetics and mechanisms[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111322.
- [16] XIAO H W, PAN Z L, DENG L Z, et al. Recent developments and trends in thermal blanching-A comprehensive review[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101-127.
- [17] 张振娜, 刘祥宇, 王云阳. 果蔬烫漂护色技术应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2411-2418. [ZHANG Z N, LIU X Y, WANG Y Y. Research progress in the application of blanching and color-protecting of fruits and vegetables[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(10): 2411-2418.]
- [18] MOSCETTI R, RAPONI F, MONARCA D, et al. Effects of hot-water and steam blanching of sliced potato on polyphenol oxidase activity[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(2): 403-411.
- [19] SHALINI G R, SHIVHARE U S, BASU S. Thermal inactivation kinetics of peroxidase in mint leaves[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 147-153.
- [20] SHIN H R, PARK J H, LEE S Y, et al. The difference of the quality characteristics of shepherd's purse (*Capsella bursa-pastoris*) with the re-treatment, freezing and thawing methods[J]. Food Engineering Progress, 2016, 20(4): 269-277.
- [21] 康三江, 张永茂, 张海燕, 等. 漂烫对速冻苹果丁过氧化物酶活性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 333-338. [KANG S J, ZHANG Y M, ZHANG H Y, et al. Effect of blanching on peroxidase activity and the qualities of quick-frozen apple cubes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(23): 333-338.]
- [22] COSTA HCB, SIGUEMOTO É S, CAVALCANTE T A B

- B, et al. Effect of microwave-assisted processing on polyphenol oxidase and peroxidase inactivation kinetics of açai-berry (*Euterpe oleracea*) pulp[J]. *Food Chemistry*, 2021, 341: 128287.
- [ 23 ] ZHENG H, LU H F. Effect of microwave pretreatment on the kinetics of ascorbic acid degradation and peroxidase inactivation in different parts of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) during water blanching[J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(4): 1087–1093.
- [ 24 ] 程玉静,袁春新,唐明霞,等. 芥菜烫漂工艺优化[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(3): 421–424. [ CHEN Y J, YUAN C X, TANG M X, et al. Optimization of blanching techniques for *Capsella bursa-pastoris*[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(3): 421–424. ]
- [ 25 ] 姜永平,宋益民,袁春新. 芥菜烫漂工艺的研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 101–105. [ JIANG Y P, SONG Y M, YUAN C X. Study on blanching of *Capsella bursa-pastoris*[J]. *Chinese Agricultural Sciences Bulletin*, 2014, 30(3): 101–105. ]
- [ 26 ] CHUTIA H, KALITA D, MAHANTA C L, et al. Kinetics of inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase in tender coconut water by dielectric barrier discharge plasma[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 101: 625–629.
- [ 27 ] 黄晓杰,张俏,石国英,等. 草莓漂烫过程中过氧化物酶和  $V_C$  的失活动力学[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(11): 77–80. [ HUANG X J, ZHANG Q, SHI G Y, et al. Kinetics model of POD and  $V_C$  degradation in strawberry during blanching[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(11): 77–80. ]
- [ 28 ] 郑海鹰,傅玉颖,石玉刚,等. 莴笋烫漂过程中过氧化物酶失活动力学模型的建立[J]. *食品科学*, 2011, 32(17): 238–242. [ ZHENG H Y, FU Y Y, SHI Y G, et al. Kinetic models of peroxidase inactivation in asparagus lettuce due to blanching[J]. *Food Science*, 2011, 32(17): 238–242. ]
- [ 29 ] 曾韶西,王以柔,刘鸿先. 低温光照下与黄瓜子叶叶绿素降低有关的酶促反应[J]. *植物生理学报*, 1991, 17(2): 177–182. [ ZENG S X, WANG Y R, LIU H X. Some enzymatic reactions related to chlorophyll degradation in cucumber cotyledons under chilling in the light[J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1991, 17(2): 177–182. ]
- [ 30 ] 吴海燕,张新宇,陈建军,等. 反相高效液相色谱法测定芥菜中的维生素 C[J]. *中国果菜*, 2020, 40(2): 44–47, 53. [ WU H Y, ZHANG X Y, CHEN J J, et al. Determination of vitamin C in capsellae by RP-HPLC[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(2): 44–47, 53. ]
- [ 31 ] 宋晓倩. 基于过氧化物酶和淀粉特性的红薯片带式催化红外干法烫漂组合干燥研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021, 27. [ SONG X Q. Study on belt catalytic infrared dry blanching combined drying of sweet potato slices based on the characteristics of peroxidase and starch[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021, 27. ]
- [ 32 ] 吴倩,余元善,刘淑媚,等. 橄榄多酚氧化酶和过氧化物酶的抑制剂筛选及其热失活动力学[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(2): 157–162. [ WU Q, YU Y S, LIU S M, et al. Inhibitors of polyphenol oxidase and peroxidase in olive and their thermal inactivation kinetics[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(2): 157–162. ]
- [ 33 ] RAYAN A, MORSY N. Thermal inactivation kinetics of peroxidase and polyphenol oxidase from pomegranate arils (*Punica granatum* L. cv. Wonderful)[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(10): 13428.
- [ 34 ] GONG C, ZHAO Y Y, ZHANG H J, et al. Investigation of radio frequency heating as a dry-blanching method for carrot cubes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 245: 53–56.
- [ 35 ] YAO Y S, SUN Y N, CUI B Z, et al. Radio frequency energy inactivates peroxidase in stem lettuce at different heating rates and associate changes in physiochemical properties and cell morphology[J]. *Food Chemistry*, 2020, 342: 128360.
- [ 36 ] BRAVO K A S, GALÁN M J, GARCÍA P G, et al. Browning reactions in olives: Mechanism and polyphenols involved[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(4): 1380–1385.
- [ 37 ] AGÜERO M V, ANSORENA M R, ROURA S I, et al. Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(3): 401–407.