

芥菜过氧化物酶热失活动动力学的研究

吴海燕^{1*}, 施晓玲², 袁秋梅¹

(1. 南通科技职业学院环境与生物工程学院, 南通 226007; 2. 南通市食品药品监督检验中心, 南通 226006)

摘要: 目的 研究不同温度、时间条件下热烫处理对芥菜中过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的影响, 探究其失活动动力学的变化规律。**方法** 芥菜在 80、85、90、95、100℃的恒温热水中烫漂一定时间, 测定烫漂后 POD 的活性, 并采用一级动力学模型对 POD 热失活动力学进行拟合, 分析 POD 的反应活化能, 不同温度下失活速率常数(k 值)和 D 值。**结果** 在 80~100℃处理范围内, 随着处理温度的上升, 芥菜 POD 失活速率常数 k 值从 0.01702 s^{-1} 增加到 0.14260 s^{-1} , D 值从 135.28702 s 降低到 16.14716 s , 反应活化能为 114.00 kJ/mol 。一级动力学模型拟合决定系数大于 0.99。**结论** 热烫处理能有效钝化新鲜芥菜 POD 活性, 随着温度的上升, POD 酶活性钝化效果明显, 芥菜 POD 的热失活动力学规律符合一级动力学模型。

关键词: 芥菜; 过氧化物酶; 酶活; 热失活动力学

Thermal inactivation kinetics of peroxidase from *Capsella bursa-pastoris*

WU Hai-Yan^{1*}, SHI Xiao-Ling², YUAN Qiu-Mei¹

(1. School of Environmental and Bioengineering, Nantong College of Science and Technology, Nantong 226007, China;
2. Nantong Food and Drug Supervision and Inspection Center, Nantong 226006, China)

ABSTRACT: Objective To study the effect of blanching on peroxidase (POD) activity in *Capsella bursa-pastoris* under different temperature and time conditions, and to explore the change of inactivation mechanism of POD. **Methods** The activity of POD was measured after blanching in hot water at 80, 85, 90, 95 and 100℃ for a certain time. A first-order kinetic model was used to fit the thermal inactivation kinetics of POD. The activation energy of POD, the rate constant of inactivation (k value) and D value of POD at different temperatures were analyzed. **Results** In the range of 80–100℃, with the increase of treatment temperature, the POD inactivation rate constant k value increased from 0.01702 s^{-1} to 0.14260 s^{-1} , D value decreased from 135.28702 s to 16.14716 s , and the activation energy was 114.00 kJ/mol . The fitting determination coefficient of the first-order dynamic model was greater than 0.99. **Conclusion** Blanching can effectively inhibit the POD activity of fresh *Capsella bursa-pastoris*. With the increase of temperature, the activity of POD enzyme is obviously inhibited. The kinetics of heat inactivation of *Capsella bursa-pastoris* is in accordance with the first-order kinetic model.

KEY WORDS: *Capsella bursa-pastoris*; peroxidase; enzyme activity; thermal inactivation kinetics

基金项目: 南通市社会民生科技项目(MS12020058)

Fund: Supported by the Nantong Science and Technology Project of Social Livelihood (MS12020058)

*通信作者: 吴海燕, 硕士, 副教授, 主要研究方向为农产品综合利用与食品安全检测。E-mail: why022@126.com

*Corresponding author: WU Hai-Yan, Master, Associate Professor, School of Environmental and Bioengineering, Nantong College of Science and Technology, No.136, Qingnian Middle Road, Chongchuan District, Nantong 226007, China. E-mail: why022@126.com

0 引言

荠菜清香爽口, 风味独特, 具有多种营养保健功效^[1-6], 深受消费者的喜爱。但是荠菜采收期短、耐贮性差, 采收极易失水萎蔫, 甚至出现软烂现象, 失去食用价值。速冻加工能较好保持蔬菜风味和新鲜度^[7], 避免采收后损失, 速冻荠菜极大地促进了荠菜产业发展。

荠菜中含有过氧化物酶(Peroxidase, POD) 等酶类^[8], 速冻加工会破坏荠菜细胞组织结构, 使氧气大量进入, 酶催化组织中的酚类物质氧化, 引起产品褐变^[9-13], 酶活性越高, 越容易引起褐变^[14], 褐变会产生不良风味、色泽, 降低产品营养价值、缩短货架期。

目前对抑制果蔬加工过程中褐变的研究较为深入, 生产中通常采用热处理使酶钝化失活, 从而达到控制褐变的目的^[15-16]。如 CHUTIA 等^[17]用蒸汽加热处理苜蓿 4.36 min, 其多酚氧化酶的残留活性为 1.31%。刘园等^[18]用热水、热蒸汽处理桃, 在 80 s 内都能较好的钝化 POD 和多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 活性。王斌等^[19]用 60°C 和 100°C 热水处理均能有效控制芋头褐变。

POD 催化植物体内多酚类物质进行氧化反应^[20]。烫漂温度、时间会影响 POD 酶活性, 从而影响产品品质。烫漂时间过短, 酶钝化不彻底, 在贮藏过程仍然会缓慢氧化褐变; 烫漂时间过长, 会导致质地软烂, 同时水溶性营养物质损失增大, 影响产品品质^[21]。研究表明: 蔬菜烫漂后保留一定酶活性, 产品品质反而更好。各种速冻蔬菜水果获得最佳品质的条件是过氧化物酶的残余活性不超过 10%^[7]。速冻蔬菜生产过程中, 热烫温度、时间组合是保证产品品质的关键工艺参数, 在此工艺条件下, 要确保 POD 残余活性不超过 10%; 同时尽可能缩短烫漂时间, 保证蔬菜质地。前期研究中, 多选择以易褐变的蔬菜水果(马铃薯、桃、苹果)为对象, 研究它们 POD 失活规律发现, 不同温度下, 烫漂处理时间在几分钟到几十分钟之间可以使 POD 酶活符合工艺要求^[15,18,7]。不同植物来源的 POD 结构、耐热性不一致^[22], 易褐变的蔬菜水果的 POD 失活规律对荠菜不一定适用; 同时荠菜组织结构柔嫩, 烫漂时间会相应缩短, 通常只需要几十秒到几分钟。但目前对于荠菜过氧化物酶热失活动力学研究鲜少。本研究以荠菜为对象, 在借鉴以往研究的基础上, 研究不同热烫温度荠菜 POD 热失活动力学参数, 建立荠菜热烫失活的动力学模型。通过模型预测烫漂温度和时间, 避免因过度烫漂对荠菜品质造成损害, 为荠菜烫漂工艺参数确定提供理论基础, 指导生产实践。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

荠菜(江苏中宝食品有限公司); 磷酸二氢钠、磷酸氢

二钠、双氧水、愈创木酚等试剂(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

TU1901 双通道紫外可见分光光度计(北京通用普析公司); BS124S 电子天平(精度 0.1 mg, 德国 Sartorius 公司); SL8R 高速冷冻离心机(美国 Thermo 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)。

1.3 实验方法

1.3.1 荠菜烫漂

挑选无病虫害、无抽薹的新鲜荠菜, 去除泥沙、有损伤叶片、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°C)烫漂一定时间(荠菜充分浸没在热水中), 烫漂结束后用冰水迅速冷却终止反应, 沥干表面水分后再进行下一步实验。

1.3.2 酶液提取

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(pH 7.0)在冰水浴上研磨成匀浆, 转入离心管中在 4°C、9000 r/min 下离心 5 min, 上清液转入 50 mL 的容量瓶, 沉淀用 10 mL 磷酸盐缓冲溶液(pH 7.0)洗一次, 再离心, 将二次离心的上清液合并收集在容量瓶中, 用磷酸盐缓冲溶液(pH 7.0)定容, 贮存于冰箱。

1.3.3 酶活测定

以 3 mL 磷酸缓冲溶液(pH 7.0)作为空白对照溶液, 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, POD 活力计算如公式(1):

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

其中, ΔA_{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 POD 的体积(mL)。

1.3.4 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^[11,23-25]。根据公式(2)计算荠菜 POD 失活动力学参数:

$$P_t/P_0 = e^{-kt} \quad (2)$$

式中: P_t 为 POD 烫漂 t 秒的酶活力[U/(g·min)]; P_0 为初始时刻的酶活力[U/(g·min)]。 k 为某一温度下酶失活反应速率常数(s^{-1}); t 烫漂时间(s)。

温度对 POD 活性的影响体现在反应速率常数上, 根据 Arrhenius 经验反应活化能公式(3)可以计算反应活化能^[24]:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

式中: A 为指前因子, 常数; E_a 为反应活化能, kJ/mol; R 为气

体常数, $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为烫漂热力学温度, K。

E_a 、 A 可以从 $\ln k$ 与 $1/T$ 作图所得回归线特征参数中求出, E_a 越小, 反应速率越大。由公式(2)、(3)转化得公式(4), 即为芥菜 POD 热烫酶失活预测模型。

$$\ln(P_t/P_0) = -Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \times t \quad (4)$$

D 值为一定温度下热处理钝化 90% POD 活力所需要处理的时间(s), 可以按公式(5)进行计算^[25-27]。 D 值越大, 说明酶对温度不敏感, 耐热性越好。

$$D = \frac{\ln 10}{k} \quad (5)$$

利用决定系数(R^2)来评价一级动力学模型拟合度, R^2 按公式(6)进行计算。 R^2 越接近 1, 模型的拟合度越好^[28]:

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

式中: Y_{mi} 和 Y_i 分别为拟合和实验测得 P_t/P_0 值; N 为某一温度下烫漂实验次数。

1.4 数据处理

使用软件 Excel 2010 和 Origin 2022 进行数据分析与画图。

2 结果与分析

2.1 POD 失活特性

POD 初始酶活力为 $3695.670 \text{ U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。芥菜热处理一段时间以后, POD 相对酶活(烫漂后残余酶活性与初始酶

活力之比, P_t/P_0)的实验结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 相同处理时间, POD 相对酶活力随着烫漂温度升高而降低, 过氧化物酶是一类氧化还原酶^[28], 在植物组织中, POD 有游离态、结合态两种形式存在^[29], 游离态 POD 存在于细胞液中, 不耐热, 受热后会迅速失活; 温度升高到 95°C , 酶失活变剧烈, 结合态 POD 失活。同一热烫温度, POD 相对酶活力随着热烫时间延长而降低, 起始阶段酶残余活力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, 残余酶活性趋向平缓。这是因为热烫起始阶段游离 POD 钝化失活, P_t/P_0 下降迅速; 中间阶段, 部分结合态的同工酶失活, 最终平缓阶段代表少量耐热 POD 有活性。芥菜 POD 失活反应的温度效应大于时间效应, 即在高处理温度下, 酶瞬间失活, 随加热时间的延长, 酶活损失速率趋于平缓。

各种速冻蔬菜水果过氧化物酶的残余活性不超过 10%是产品可接受的水平^[21]。 80°C 烫漂 180 s POD 残余酶活力为初始酶活力的 9.5%左右, 而 100°C 烫漂 20 s POD 残余酶活力为初始酶活力的 5%左右。高温短时热烫处理, 能在较短时间内钝化酶, 避免芥菜长时间受热而导致品质劣变^[30]。

2.2 动力学参数

以热烫时间为横坐标, 以 P_t/P_0 为纵坐标, 利用 Origin 2022 中 Exp1p2 函数进行拟合作图, 不同烫漂温度下 POD 酶失活一级动力学变化情况如图 1 所示。

表 1 热烫处理后 POD 相对酶活($n=3$)
Table 1 Relative enzyme activities of POD after blanching ($n=3$)

热烫时间/s	热烫温度/ $^\circ\text{C}$				
	80	85	90	95	100
20	0.701±0.003	0.637±0.009	0.528±0.003	0.294±0.003	0.050±0.003
30	0.590±0.005	0.491±0.007	0.367±0.004	0.153±0.008	0.026±0.007
40	0.502±0.002	0.393±0.003	0.288±0.002	0.080±0.005	0.021±0.006
50	0.401±0.007	0.309±0.003	0.232±0.005	0.051±0.003	0.019±0.004
60	0.352±0.004	0.248±0.005	0.178±0.006	0.048±0.004	0.015±0.002
70	0.309±0.002	0.206±0.001	0.152±0.003	0.044±0.004	0.013±0.003
80	0.261±0.003	0.162±0.004	0.112±0.001	0.042±0.003	0.004±0.005
100	0.179±0.005	0.120±0.002	0.074±0.002	0.034±0.001	0.003±0.003
120	0.142±0.001	0.086±0.001	—	—	—
150	0.111±0.003	—	—	—	—
180	0.096±0.003	—	—	—	—

注: —表示未进行实验。

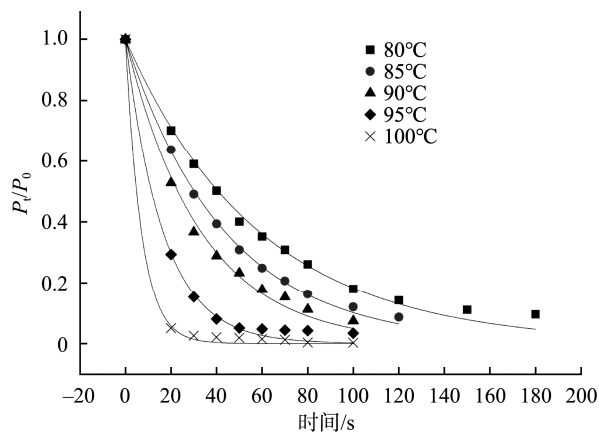


图1 POD失活一级动力学拟合结果

Fig.1 Fitting results of the first-order inactivation kinetic of POD

由图1拟合曲线可知,一级动力学模型能对POD失活动力学进行拟合,与苗文娟等^[23]研究滁菊POD的失活动力学,CHUKWUNYERE等^[24]研究黄瓜POD的失活动力学,CAO等^[31]研究蓝莓汁中POD的热钝化动力学,黄晓杰等^[30]研究草莓POD的失活动力学符合一级动力学模型的研究结果一致。由表2可知,不同温度下模型一级动力学模型拟合曲线的 R^2 均大于0.99,说明一级动力学模型能够解释烫漂过程中酶失活99%以上实验数据。动力学速率常数 k 随着温度升高而增大,说明温度升高会增强POD酶的钝化效果;不同温度下POD酶的 D 值随着温度升高而降低,说明温度越高,钝化90%所需的时间越短。

表2 POD一级失活动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of POD first-order inactivation

参数	热烫温度/°C				
	100	95	80	85	80
k/s^{-1}	0.14260	0.06061	0.03015	0.02290	0.01702
R^2	0.99855	0.99535	0.99353	0.99835	0.99431
D 值/s	16.14716	37.99018	76.37098	100.54957	135.28702

以热处理绝对温度的倒数($1/T$)为横坐标(X),以动力学速率常数的自然对数值($\ln k$)为纵坐标作回归曲线(Y),曲线方程为 $Y=-13712X+34.522$,拟合直线 R^2 为0.9303,具有良好的相关性,根据拟合直线参数求出芥菜POD的失活反应活化能 $E_a=114.00$ kJ/mol, $A=1.01 \times 10^{15}$ 。反应活

化能在40~400 kJ/mol之间,与阮卫红等^[32]研究一致。黄晓杰等^[30]在70~95°C条件下对草莓热烫处理中测得的 $E_a=74.05$ kJ/mol;而郑海鹰等^[33]在70~95°C条件下对茼蒿热烫处理中测得的 $E_a=124.35$ kJ/mol。不同来源的POD耐热性不同,其热烫失活反应机制不同,从而影响了热烫失活反应活化能。 E_a 越小,代表反应速率越快,热烫处理越容易失活。

将各参数代入公式(4),得到芥菜烫漂一级动力学模

$$\ln(P_t/P_0) = -1.01 \times 10^{15} \times e^{-\frac{13711.81}{T}} \times t。$$

2.3 模型验证

芥菜残余活性等于10%条件下,在96~99°C范围内,利用模型预测需要烫漂的时间,为了便于实际操作,烫漂时间取整数,实际烫漂时间如表3所示。按实际烫漂时间重复烫漂3次,芥菜POD残余酶活力预测值与实测值如下表3所示。

由表3可知,一级动力学模型预测POD酶活力与实际测定值之间的相对误差在0.24%~1.04%,这表明模型能较好预测POD烫漂酶失活。烫漂时间越长,叶绿素含量会减少,高温短时烫漂可以较好的保持芥菜中叶绿素,因此芥菜烫漂的最佳工艺条件是100°C条件下烫漂21 s。烫漂的芥菜冷藏5 d,叶绿素含量几乎不变;而新鲜的芥菜冷藏5 d,叶绿素损失20.5%,因此烫漂可以有效保持产品色泽。

3 结论

热处理能有效钝化新鲜芥菜POD活性,在80~100°C范围内,温度越高,POD酶活性钝化效果越明显,芥菜POD的热失活动力学符合一级动力学模型,POD酶活降解模型:

$\ln(P_t/P_0) = -1.01 \times 10^{15} \times e^{-\frac{13711.81}{T}} \times t$,模型拟合曲线的 R^2 都大于0.99,模型能较好预测烫漂的实际酶活。随着烫漂温度的上升,芥菜POD失活速率常数 k 值逐渐增加, D 值逐渐降低, $E_a=114.00$ kJ/mol,高温短时(100°C, 21 s)烫漂可以较好保持芥菜中的叶绿素。该结果为高温钝化芥菜POD的提供理论依据,也为芥菜烫漂工艺参数确定提供了参考。

表3 烫漂后POD酶活力预测值与实测值($n=3$)Table 3 Predicted values and experimental values of POD activities after blanching ($n=3$)

热烫温度/°C	预测时间/s	实际时间/s	预测酶活/[U/(g·min)]	实测酶活/[U/(g·min)]	相对误差/%	叶绿素含量/(mg/g)
100	20.726	21	358.505	357.643±0.065	0.24	1.508±0.003
99	22.877	23	365.034	367.823±0.107	0.76	1.457±0.001
98	25.265	26	345.626	349.268±0.061	1.04	1.313±0.003
97	27.917	28	367.044	369.049±0.289	0.54	1.133±0.073
96	30.864	31	365.830	368.633±0.280	0.76	0.955±0.002

参考文献

- [1] ALSNAFI AE. The chemical constituents and pharmacological effects of *Capsella bursa-pastoris*-A review [J]. Int J Pharmacol Toxicol, 2015, 5(2): 76-81.
- [2] 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 J Sci, 2022, 48(3): 1-11.
- [3] XIE LK, XU XJ, 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]. J Ethnopharmacol, 2022, 284(10): 114783.
- [4] YILDIRIM BA, AYDIN T, KORDALI S, et al. Antihemorrhoidal activity of organic acids of *Capsella bursa-pastoris* on croton oil-induced hemorrhoid in rats [J]. J Food Biochem, 2020, 44(9): 1-10.
- [5] HWANG JT, CHOI E, CHOI HK, et al. The cholesterol-lowering effect of *Capsella bursa-pastoris* is mediated via SREBP2 and HNF-1 α -regulated pcsk9 inhibition in obese mice and HepG2 cells [J]. Foods, 2021, 10(2): 1-14.
- [6] 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 Chem, 2021, 342: 1-11.
- [7] 康三江, 张海燕, 宋娟. 速冻乌龙头芽加工工艺优化及品质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 220-227.
- KANG SJ, ZHANG HY, SONG J. Processing technology optimization and quality analysis of frozen *Aralia chinensis* L. Bud [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(1): 220-227.
- [8] 张艳芬. 低温贮藏期间芥菜品质和生理特性变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- ZHANG YF. Quality and physiological characteristic changes of *Capsella bursa-pastoris* during refrigerated storage [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [9] CHENG LN, WU WJ, AN KJ, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry [J]. Crystals, 2020, 10(5): 368-383.
- [10] 普红梅, 李宏, 王海丹, 等. 4 种蔬菜氧化酶, 过氧化物酶活性测定及其抑制研究[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 281-287.
- PU HM, LI H, WANG HD, et al. Activity determination and inhibition of 4 kinds of vegetable oxidase and peroxidase [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(12): 281-287.
- [11] CHUTIA H, KALITA D, MAHANTA CL, et al. Kinetics of inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase in tender coconut water by dielectric barrier discharge plasma [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 101: 625-629.
- [12] 李京赞, 刘玉德, 石文天, 等. 植物果蔬的褐变及抑制的研究[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 63-68.
- LI JZ, LIU YD, SHI WT, et al. Advances in research on browning and inhibition of plant fruits and vegetables [J]. Packag Food Mach, 2019, 37(1): 63-68.
- [13] 冯程程, 于筠, 王春玲. 不同贮藏温度下鲜切紫甘薯褐变相关因素研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 244-249, 253.
- FENG CC, YU J, WANG CL. Browning related factors of fresh-cut purple sweet potato under different storage temperatures [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(6): 244-249, 253.
- [14] 吴倩, 余元善, 刘淑娟, 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 YS, LIU SM, et al. Inhibitors of polyphenol oxidase and peroxidase in olive and their thermal inactivation kinetics [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(2): 157-162.
- [15] 公营, 王庆国, 孟庆昌, 等. 鲜切马铃薯褐变控制技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(19): 6573-6578.
- GONG Y, WANG QG, MENG QC, et al. Advances on the inhibition techniques of browning of fresh cut potato [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(19): 6573-6578.
- [16] 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 ZN, LIU XY, WANG YY. Research progress in the application of blanching and color-protecting of fruits and vegetables [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(10): 2411-2418.
- [17] CHUTIA H, KALITA D, MAHANTA CL, et al. Kinetics of inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase in tender coconut water by dielectric barrier discharge plasma [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 101: 625-629.
- [18] 刘园, 肖广健, 陈飞, 等. 热烫方式对桃微观结构、酶促褐变及相关品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 183-190.
- LIU Y, XIAO GJ, CHEN F, et al. Effects of blanching methods on microstructure, enzymatic browning and related quality of peach [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(20): 183-190.
- [19] 王斌, 方美珊, 何金明. 芋头冻藏保鲜研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 112-118.
- WANG B, FANG MS, HE JM. Study on freezing storage of taro [J]. Food Res Dev, 2020, 41(24): 112-118.
- [20] 徐阳, 辛嘉英, 王雨晴, 等. 过氧化物酶及其模拟物在食品分析中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 21(12): 8494-8500.
- XU Y, XIN JY, WANG YQ, et al. Research progress on the application of peroxidase and its mimetic enzyme in food analysis [J]. J Food Saf Qual, 2021, 21(12): 8494-8500.
- [21] 舒亚非, 吴仕敏, 李瑞琳, 等. 响应面法优化天麻脯制作工艺及其品质分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(12): 71-78.
- SHU YF, WU SM, LI RL, et al. Optimization of production process and quality analysis of preserved *Gastrodiaelata* by response surface methodology [J]. Food Res Dev, 2022, 43(12): 71-78.
- [22] COSTA HCB, SIGUEMOTO ÉS, AUGUSTO CTBB, et al. Effect of

- microwave-assisted processing on polyphenol oxidase and peroxidase inactivation kinetics of açai-berry (*Euterpe oleracea*) pulp [J]. *Food Chem*, 2021, 341: 128287.
- [23] 苗文娟, 何鑫, 夏玥, 等. 滁菊多酚氧化酶和过氧化物酶热钝化动力学研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(13): 9–14.
- MIAO WJ, HE X, XIA Y, *et al.* Thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase from Chuju [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(13): 9–14.
- [24] CHUKWUNYERE IC, IFEANYL UF, AMAECHL OL, *et al.* Evaluation of inactivation kinetics and thermodynamic properties of peroxidase from *Cucumis sativus* for biotechnological and industrial applications [J]. *J Adv Biol Biotechnol*, 2021, 24(6): 46–62.
- [25] RAYAN A, MORSY N. Thermal inactivation kinetics of peroxidase and polyphenol oxidase from pomegranate arils (*Punica granatum* L. cv. Wonderful) [J]. *J Food Biochem*, 2020, 44(10): 13428.
- [26] KANJANAPONGKUL K, BAIBUA V. Effects of ohmic pasteurization of coconut water on polyphenol oxidase and peroxidase inactivation and pink discoloration prevention [J]. *J Food Eng*, 2021, 292: 110268.
- [27] 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.
- SONG XQ. 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.
- [28] 朱玉芸, 吕新林, 李祥激, 等. 亳菊 POD 酶的酶学特性研究[J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(8): 1596–1601.
- ZHU YY, LV XL, L XW, *et al.* Enzymatic characteristics of peroxidase from *Chrysanthemum morifolium* cv. Bo-ju [J]. *China J Chin Mater Med*, 2018, 43(8): 1596–1601.
- [29] 王蓓, 郭志雄, 柯思敏, 等. 荔枝果皮的结合态 POD 及其在果实生长发育过程中的变化[J]. *果树学报*, 2014, 31(4): 642–647.
- WANG B, GUO ZX, KE SM, *et al.* Membrane/wall-bound peroxidase in litchi pericarp and their changes during fruit development [J]. *J Fruit Sci*, 2014, 31(4): 642–647.
- [30] 黄晓杰, 张俏, 石国英, 等. 草莓烫漂过程中过氧化物酶和 VC 的失活动力学[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(11): 77–80.
- HUANG XJ, ZHANG Q, SHI GY, *et al.* Kinetics model of POD and VC degradation in strawberry during blanching [J]. *Food Ferment Ind*, 2013, 39(11): 77–80.
- [31] CAO XM, CAI CF, WANG YL, *et al.* The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments [J]. *Innovat Food Sci Emerg Technol*, 2018, 45(2): 169–178.
- [32] 阮卫红, 邓放明, 毕金峰, 等. 桃汁热处理过程中非酶褐变动力学研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 50–55.
- RUAN WH, DENG FM, BI JF, *et al.* Kinetic study of non-enzymatic browning of peach Juice during thermal treatments [J]. *Food Sci*, 2014, 35(1): 50–55.
- [33] 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 HY, FU YY, SHI YG, *et al.* Kinetic models of peroxidase inactivation in *Asparagus* lettuce due to blanching [J]. *Food Sci*, 2011, 32(17): 238–242.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



吴海燕, 硕士, 副教授, 主要研究方向为农产品综合利用与食品安全检测。
E-mail: why022@126.com