

挤压猕猴桃猪肉干维生素 C 损失预测模型研究

Research on vitamin C loss prediction model of extruded kiwifruit pork jerky

张广涛 李静鹏 马秀兰 邓 力

ZHANG Guangtao LI Jingpeng MA Xiulan DENG Li

(贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550000)

(School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550000, China)

摘要: [目的] 探索双螺杆挤压猕猴桃猪肉干中维生素 C 的损失规律, 解决挤压过程中营养物质损失的“黑箱”问题。 [方法] 使用双螺杆挤压机生产猕猴桃猪肉干, 采用高效液相色谱法测定物料挤压前后的维生素 C 含量, 以平均停留时间作为物料在机筒内的反应时间, 对不同挤压条件下维生素 C 损失率进行动力学分析。 [结果] 挤压过程中增大机筒温度和水分含量、降低螺杆转速和果干添加量会使挤出物维生素 C 损失率增大, 平均停留时间与维生素 C 损失率变化规律基本保持一致, 动力学分析表明挤压过程中维生素 C 损失遵循一级动力学模型, 维生素 C 损失速率常数为 $0.003\ 54 \sim 0.006\ 05\ \text{s}^{-1}$ 。 [结论] 平均停留时间是影响维生素 C 损失率变化的重要原因, 通过多元回归分析得到维生素 C 损失率的预测模型, 可实现不同条件下维生素 C 损失率变化规律的合理预测, 降低生产成本。

关键词: 双螺杆挤压; 猕猴桃; 猪肉; 平均停留时间; 维生素 C; 动力学分析

Abstract: [Objective] In order to explore the loss pattern of V_C in kiwifruit pork jerky by twin-screw extrusion and solve the "black box" problem of nutrient loss during the extrusion process. [Methods] In this paper, a twin-screw extruder was used to produce kiwifruit pork jerky, and the V_C content of the material before and after extrusion was determined by high performance liquid chromatography, and the Mean Residence Time (MRT) was used as the reaction time of the material in the barrel, and the V_C loss rate under different extrusion conditions was dynamically analyzed. [Results] Increasing the temperature and moisture content of the barrel, decreasing the screw speed, and increasing the amount of dried fruit added during the extrusion

process will increase the V_C loss rate of the extruded material. The variation pattern of MRT and V_C loss rate is basically consistent. Dynamic analysis shows that V_C loss during the extrusion process follows a first-order dynamic model, and the V_C loss rate constant is between $0.003\ 54$ and $0.006\ 05\ \text{s}^{-1}$. [Conclusion] MRT is an important factor affecting the variation of V_C loss rate. A predictive model for V_C loss rate can be obtained through multiple regression analysis, which can achieve reasonable prediction of the variation pattern of V_C loss rate under different conditions and reduce production costs.

Keywords: twin-screw extrusion; kiwifruit; pork; the mean residence time; vitamin C; kinetic analysis

猕猴桃肉质柔软, 口感酸甜, 富含维生素 C、糖类和多种人体必需氨基酸, 具有较高的营养和经济价值, 深受消费者的喜爱^[1]。除了鲜食外, 猕猴桃制品也深受人们的欢迎, 例如猕猴桃汁、醋、干片、果酱、果酒、酸奶和果冻等^[2]。国内外针对猕猴桃及其制品的研究大多侧重于其营养特性、理化特性及生物活性等^[3-4]。挤压肉干具有易于加工、滋味鲜美、食用和携带方便等诸多特点, 是消费者喜爱的肉制品之一。而随着时代的变迁, 消费者对方便、味美和营养丰富的食品需求不断增加。传统的猪肉干制作工艺主要通过调整调味料的种类及其配比来获得不同风味的猪肉干产品, 其营养成分主要来源于猪肉。鉴于猕猴桃丰富的营养价值及独特口感, 研究拟采用双螺杆挤压技术将猕猴桃果干与猪肉进行复配挤压。

目前, 对于挤压过程中营养物质损失变化的研究主要基于经验试错法, 成本较高。而构建营养物质损失预测模型, 可以作为研究和优化挤压过程的良好替代方案^[5]。由于猕猴桃中所富含的维生素 C 是热敏性成分, 在挤压过程中易损失, 故研究拟对猕猴桃与猪肉干挤压过程中维生素 C 含量变化及损失动力学展开研究, 以期构建维生素 C 损失率预测模型, 实现不同挤压条件下的维生素 C 损失率变化规律的合理预测, 在后期生产试验中降低成本, 指导生产实践。

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 32260642, 32260644); 贵州省科技计划项目(编号: 黔科合基础-ZK[2022]一般 066)

作者简介: 张广涛, 男, 硕士。

通信作者: 邓力(1966—), 男, 贵州大学教授, 博士。

E-mail: 294280819@qq.com

收稿日期: 2024-01-12 **改回日期:** 2024-06-05

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

猪后腿肉:贵阳市花溪区巨农屠宰场;

马铃薯淀粉、各种调味品:贵阳市花溪区合力超市;

猕猴桃果干:贵州山珍宝绿色科技开发有限公司;

大豆分离蛋白:粗蛋白干基含量 $\geq 90\%$,山东禹王实业有限公司;

偏磷酸:含量(以 HPO_3 计) $\geq 38\%$,国药集团化学试剂有限公司;

甲醇:色谱纯,北京百灵威科技有限公司;

$L(+)$ -抗坏血酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$)标准品:纯度 $\geq 99\%$,上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

双螺杆挤压机:DS32-II 实验型,螺杆直径 32 mm,两螺杆中心距 26 mm,螺杆长径比 18.75,模头圆形开孔直径 5 mm,机筒为 3 段式加热(I 区为输送混合区,II 区为压缩剪切区,III 区为加热熔融区),济南赛信机械有限公司;

高效液相色谱仪:Agilent1260 型,配有二极管阵列检测器或紫外检测,美国 Agilent 公司;

便携式精密色差仪:WSC-3B 型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

多功能食品加工机:4500A 型,永康市速峰工贸有限公司;

卤素水分测定仪:MB35 型,奥豪斯国际贸易有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG9146A 型,上海精宏试验设备有限公司;

台式高速冷冻离心机:TGL20M 型,长沙迈佳森设备有限公司;

拉丝机:LS-2 型,南京明瑞机械设备有限公司;

质构仪:CT3 型,美国 Brookfield 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 双螺杆挤压猕猴桃肉干制备

(1) 猕猴桃果干预处理:将猕猴桃果干复水,剪碎成约 5 mm $\times$ 5 mm 的片状,控制果干水分含量为 40%左右。

(2) 挤压肉干样品制作流程:根据文献[6]²¹方法进行适当改进,如图 1 所示。取新鲜猪后腿精瘦肉预煮,顺着肌纤维方向切成约 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 0.2 cm 的片状,加入调味料复煮后于 60 °C 鼓风干燥,控制水分约为 30%,随后用 LS-2 型拉丝机进行拉丝。按试验设计比例加入预处理后的猕猴桃果干、质量分数为 10%的大豆分离蛋白和 8%的马铃薯淀粉,调整挤压前湿基含水率约为 40%,用保鲜膜密封并静置过夜以平衡水分。使用 DS32-II 实验型双螺杆挤压机进行挤压,待挤压过程稳定后进

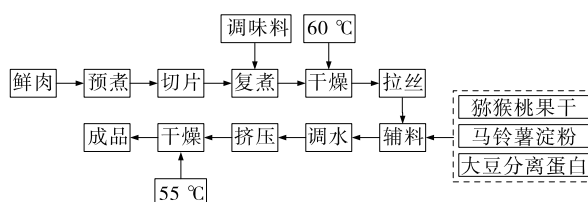


图 1 挤压猕猴桃肉干工艺流程

Figure 1 Extruded kiwifruit pork jerky process

行取样,样品自封袋密封待测。

1.2.2 试验设计 固定挤压机喂料速度与螺杆转速的比例,以螺杆转速为试验因素。固定机筒温度为 150 °C,螺杆转速为 144.0 r/min,水分含量为 39%,猕猴桃果干添加量为 15%,采用控制变量法考察机筒温度(110, 130, 150, 170, 190 °C)、螺杆转速(115.2, 129.6, 144.0, 158.4, 172.8 r/min)、水分含量(33%, 36%, 39%, 42%, 45%)、果干添加量(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)对挤压猪肉干中维生素 C 含量及物料平均停留时间的影响。

1.2.3 水分含量测定 采用快速卤素水分测定仪测定挤压物料的水分含量,设定仪器测试温度为 110 °C。将物料充分混匀后随机选取不同位置的物料进行测定,每次测定量控制在 0.75 g 左右,记录水分含量值。每组样品重复测定 5 次,结果取平均值。

1.2.4 维生素 C 含量测定及损失率计算

(1) 维生素 C 含量测定:根据 GB 5009.86—2016 采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定猕猴桃猪肉干中维生素 C 的含量。以 $L(+)$ -抗坏血酸为标样作标准曲线,通过标准曲线计算出挤压前后维生素 C 的含量。

(2) 维生素 C 损失率计算:猕猴桃猪肉干挤压过程中维生素 C 的损失率(loss rate, R_L)可通过式(1)进行计算^{[6]23}。

$$R_L = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Q_t ——挤压后猕猴桃猪肉干维生素 C 的含量,mg/g;

Q_0 ——挤压前猕猴桃猪肉干物料维生素 C 的含量,mg/g;

R_L ——维生素 C 损失率,%。

1.2.5 平均停留时间测定

(1) 示踪剂制备:选择碳粉作为示踪剂,称取一定量调配好的猕猴桃猪肉干挤压物料与碳粉充分混匀,控制碳粉与物料质量比为 1:1,随后精确称取 1.00 g 分装成小袋备用。

(2) 样品制备:参照文献[7],按试验设计调配好挤压物料和设定挤压机参数,挤压机运行稳定后,从喂料口迅速加入 1 袋示踪剂并计时,每 10 s 取样 1 次。挤压过程中不断观察模口处挤出物的颜色,并与计时开始时挤出物颜

色进行对比,模口处挤出物中示踪剂颜色会由浅变深,再逐渐变浅直至示踪剂颜色消失,待目测模口处挤出物颜色与计时开始时挤出物颜色大致相同,且恒定不变后,终止取样并关闭计时,记录停止取样时间,保存肉干样品。

(3) 样品色差测定:将加了示踪剂的挤压猕猴桃肉干样品用多功能食品加工机粉碎,用模具将粉碎后的样品压实成饼状,采用色差仪对挤出物样品颜色进行测定,每组样品对 3 个不同位置进行测定,每个位置平行测定 3 次,记录亮度 L^* 、 a^* 、 b^* ,按式(2)计算色差值,所得结果取平均值,即为挤压猕猴桃肉干样品的各个色差值。

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

式中:

ΔE ——每 10 s 取得的样品与初始样品的色差;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——初始样品的亮度、红度、黄度;

L^* 、 a^* 、 b^* ——每 10 s 取得的样品的亮度、红度、黄度。

1.2.6 示踪剂质量分数标准曲线绘制 选择活性炭作为示踪剂,通过预试验探究,将碳粉质量分数分别设置为 0, 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00, 4.00, 8.00, 20.00 mg/g, 分装成 1.00 g 的小袋,挤压机运行稳定后,迅速从喂料口加入,按照 1.2.5 中的方法收集挤出物样品,每个质量分数下进行 3 次平行试验,每组试验测定 3 次,进行色差测定并记录,试验结果取平均值。通过所测色差结果,建立各色差参数(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE)与碳粉质量分数之间的关系,绘制标准曲线。

1.3 数据处理

1.3.1 平均停留时间计算 根据 1.2.6 所得到的标准曲线,通过色差参数计算出所测样品中示踪剂的质量分数,通过式(3)计算得到停留时间分布 $E(t)$ 。

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t) dt} \cong \frac{C_i}{\sum_0^n C_i \Delta t_i}, \quad (3)$$

式中:

$E(t)$ ——在时间 t 时流出挤压机的物料体积占进料体积的体积分数, %;

$C(t)$ ——在时间 t 时出口处示踪剂的质量分数, %;

C_i ——第 i 段内示踪剂的质量分数, mg/g;

Δt_i ——不同时间段, s。

也可以用其积分形式——累计停留时间分布函数 $F(t)$ 表示, 计算式为:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \cong \frac{\sum_0^t C_i \Delta t_i}{\sum_0^n C_i \Delta t_i}, \quad (4)$$

式中:

$F(t)$ ——经过 t 时间后离开挤压机的物料体积占总进料体积的体积分数, %。

根据式(5)计算得到挤压物料在机筒内的平均停留时间。

$$t_m = \int_0^\infty t E(t) dt = \frac{\int_0^\infty C(t) t dt}{\int_0^\infty C(t) dt} \cong \frac{\sum_0^t C_i t_i \Delta t_i}{\sum_0^n C_i \Delta t_i}, \quad (5)$$

式中:

t_m ——平均停留时间, s;

t_i ——第 i 段的挤出时间, s。

1.3.2 维生素 C 损失反应级数确定 食品体系中某个组分损失的速度用 Weibull 模型[式(6)]表示^{[8]169-170}。

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n, \quad (6)$$

式中:

C —— t 时刻的反应物 A 质量分数, mg/g;

k ——反应速率常数, s^{-1} ;

t ——反应时间, s。

对式(6)积分, 如果 $n=1$, 得式(7)。

$$\frac{C}{C_0} = \exp(-kt), \quad (7)$$

如果 $n \neq 1$, 则得式(8)。

$$\frac{C}{C_0} = [1 + (n-1)kC_0^{n-1}t]^{-\frac{1}{n-1}}, \quad (8)$$

式中:

C_0 ——初始反应物质量分数, mg/g。

确定反应级数的方法有微分法和积分法两种, 采用微分法, 即由式(6)通过微分法确定维生素 C 损失的反应级数。式(6)可转变为式(9)。

$$\frac{C_0 - C}{t_m} = kC_0^n, \quad (9)$$

式中:

t_m ——平均停留时间, s。

对式(9)两边取对数, $\ln\left(\frac{C_0 - C}{t_m}\right)$ 对 $\ln(C_0)$ 作图得一直线, 则斜率为反应级数。

1.3.3 维生素 C 损失动力学参数确定 通常认为速率常数 k 与温度 T 的关系遵循 Arrhenius 方程^[9], 即:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (10)$$

式中:

k ——速率常数;

k_0 ——指前因子, s^{-1} ;

E_a ——活化能, J/mol;

R ——气体常数, 8.314 J/(mol · K);

T ——反应温度, K。

1.3.4 数据分析 采用 MATLAB 2019 a、EXCEL 2019、ORIGIN 2017 软件进行数据分析、作图并分析显著性差异。确定反应速率常数 k , 反应级数 n , 同时求出反应的活化能 E_a 。

2 结果与分析

2.1 碳粉质量分数与色差的关系

利用色差计测定挤出物的颜色变化,通过拟合建立碳粉质量分数与色差参数 ΔE 的关系,见式(11),碳粉浓度标准曲线如图 2 所示。决定系数 R^2 为 0.993 3,为显著相关。

$$C_T = 3.598\ 2\Delta E + 18.978\ 4, \quad (11)$$

式中:

C_T ——碳粉指示剂质量分数,mg/g;

ΔE ——每 10 s 时间间隔下的挤出物颜色与初始挤出物的色差。

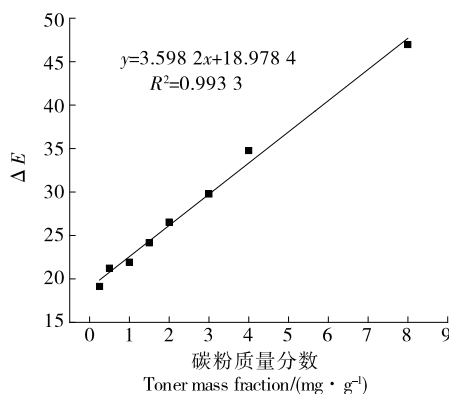


图 2 碳粉质量分数标准曲线

Figure 2 Standard curve of toner mass fraction

2.2 维生素 C 质量浓度变化标准曲线

通过高效液相色谱法测定得到维生素 C 标准曲线如图 3 所示,由标准曲线计算出各挤压条件下物料中维生素 C 的含量。

2.3 挤压工艺对挤出物维生素 C 含量及损失率的影响

2.3.1 机筒温度 挤压前维生素 C 含量为 32.98 mg/100 g,猕猴桃肉干挤压过程中维生素 C 含量及损失率随机筒温度的变化关系如图 4 所示。由图 4 可知,机筒温度为

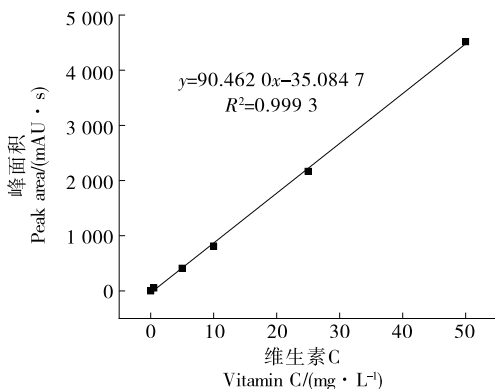
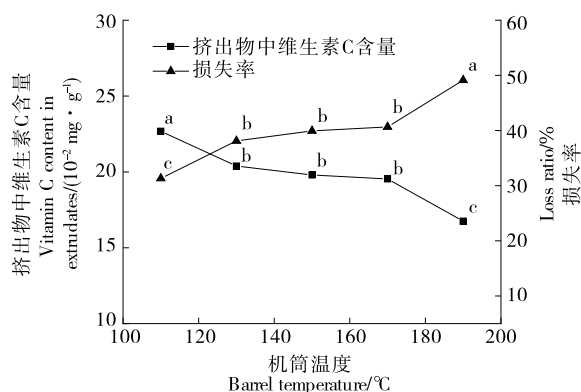


图 3 维生素 C 质量浓度变化标准曲线

Figure 3 Standard curve of vitamin C mass concentration change



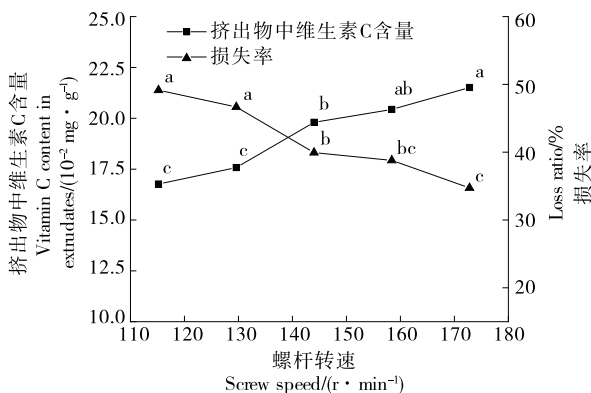
小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 不同机筒温度下挤出物中的维生素 C 含量及损失率变化

Figure 4 Changes of vitamin C content and loss rate in extrudates at different barrel temperatures

110~190 °C 时,维生素 C 含量及损失率变化范围为 16.741 5~22.652 0 mg/100 g、31.32%~49.13%。机筒温度越高,维生素 C 含量越低,损失率逐渐增大。挤压机是一个高温高压生化反应过程,由于维生素 C 是热敏性成分,在热处理过程中容易损失^[10]。猕猴桃肉干挤压过程中,随着机筒温度的升高,维生素 C 在机筒内的降解速率加快,导致挤出物中维生素 C 含量降低,损失率增大。

2.3.2 螺杆转速 由图 5 可知,螺杆转速与猕猴桃肉干中维生素 C 含量成正比,与损失率成反比。在螺杆转速为 115.2~172.8 r/min 时,二者变化范围分别在 16.75~21.49 mg/100 g、34.74%~49.15%。螺杆是挤压过程中物料向前运输的主要驱动力,同时还能提供剪切力^[11]。螺杆转速增大时,物料向前输送速度加快,在高温高压的机筒环境中的反应时间缩短,维生素 C 损失减少,因而高螺杆转速较低螺杆转速下的维生素 C 含量多,损失率降低。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同螺杆转速下挤出物中的维生素 C 含量及损失率变化

Figure 5 Changes of vitamin C content and loss rate in extrudates at different screw speeds

2.3.3 水分含量 由图6可知,随着挤压物料水分含量不断增大,维生素C含量降低,维生素C损失率增大。损失率变化范围在20.19%~37.41%。以往针对挤压饲料的研究^[12-13]表明,水分的增加以及挤出温度的增加会降低维生素C的保留。维生素C是一种水溶性维生素,水分含量越高时,猕猴桃果干中的维生素C更多地溶解于水中,水分经过高温高压的机筒后,从模口挤出时快速蒸发,导致挤压物料水分含量越高维生素C损失越多,挤出物中的维生素C含量越低,损失率增大。

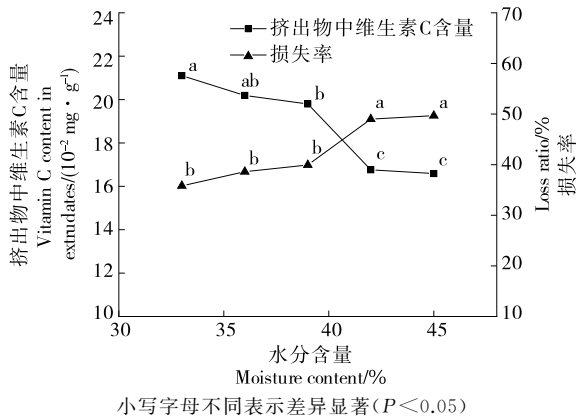


图6 不同水分含量下挤出物中的维生素C含量及损失率变化

Figure 6 Changes of vitamin C content and loss rate in extrudates at different moisture content

2.3.4 果干添加量 如图7所示,添加猕猴桃果干会使挤出物中的维生素C含量显著增多,在猕猴桃果干添加量为5%时,维生素C含量约为5.58 mg/100 g,添加量为25%时维生素C含量达到最高,为28.72 mg/100 g,约为添加量为5%时的5倍。随果干添加量的增大,维生素C

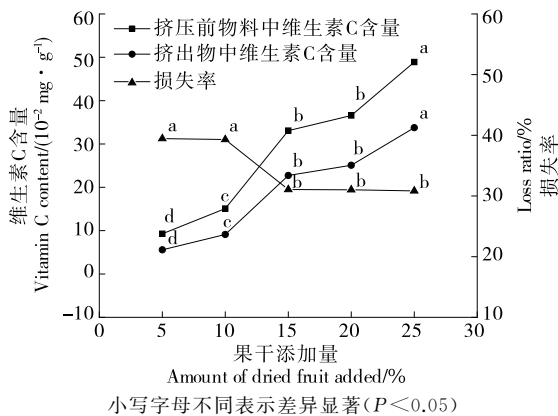


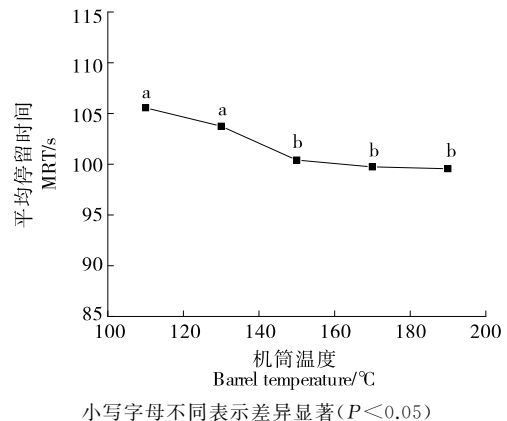
图7 不同果干添加量下挤出物中的维生素C含量及损失率变化

Figure 7 Changes of vitamin C content and loss rate before and after extrusion under different dried fruit supplemental levels

损失率逐渐降低,在果干添加量为15%~25%时降低趋势变缓。挤压过程存在高温、高剪切作用,会使物料中的维生素C迅速降解^[14],导致挤出物中维生素C含量降低。在挤压机内短时间的作用下,不同样品的维生素C损失量基本相当,因此果干添加量越大,维生素C损失率越低。

2.4 挤压工艺对挤出物平均停留时间的影响

2.4.1 机筒温度 如图8所示,升高机筒温度,挤压物料在机筒内的平均停留时间逐渐缩短。结合图4可以看出,在不同的机筒温度下,平均停留时间越短,维生素C损失率越大。较高的挤压温度导致料筒中物料的黏度降低^[15],物料向前输送所受到的摩擦力做功变小,变得更易流动,物料在机筒内的停留时间缩短,故平均停留时间缩短。这与苏婕妤^{[6]30-31}和Kumar等^[16]的研究结果一致。但也有研究^[11,17]表明,提高机筒温度,会使平均停留时间延长,与试验结果有所差异,可能是因为挤压材料、挤压机型号和挤压机使用年限不同造成的。

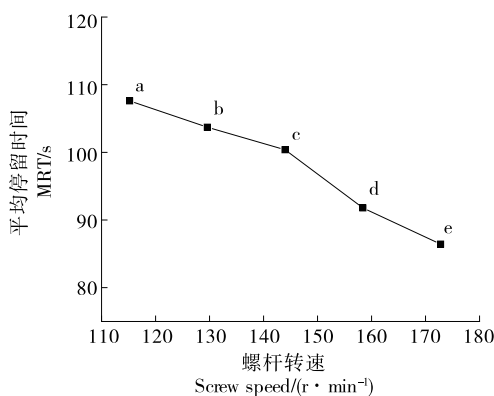


小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图8 机筒温度对挤压猕猴桃肉干平均停留时间的影响
Figure 8 Effect of barrel temperature on mean residence time of extruded kiwifruit pork jerky

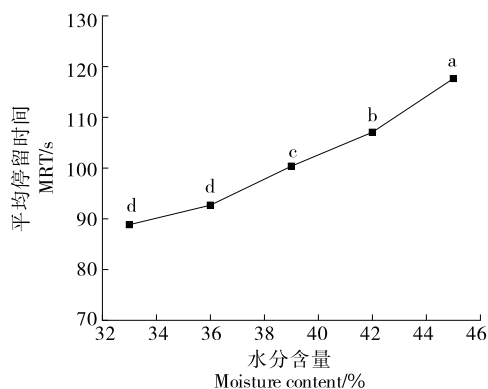
2.4.2 螺杆转速 如图9所示,增大螺杆转速,物料在机筒内的平均停留时间缩短。螺杆转速由115.2 r/min增至172.8 r/min,平均停留时间由123.38 s缩短至82.68 s。结合图5可知,维生素C损失率随平均停留时间的增大而降低。螺杆是机筒内物料前进的主要动力,当螺杆转速增大时,物料在机筒内的输送速度增大^[18],平均停留时间缩短。同时,螺杆转速是使物料产生剪切力的主要作用力,增大螺杆转速时作用于挤压物料的剪切力增大,使其表观黏度降低,减少了物料运输与机筒产生的摩擦阻力^[19],导致物料在机筒内的平均停留时间减少。

2.4.3 水分含量 如图10所示,随着物料水分的升高,平均停留时间增大。水分由33%增大到45%,物料在挤压机内的平均停留时间由88.88 s增加至117.76 s。结合图6分析可知,平均停留时间的延长,损失率呈增大的趋势。由于水分含量对平均停留时间有显著影响^[20],随着



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 9 螺杆转速对挤压猕猴桃肉干平均停留时间的影响
Figure 9 Effect of screw speed on mean residence time of extruded kiwifruit pork jerky

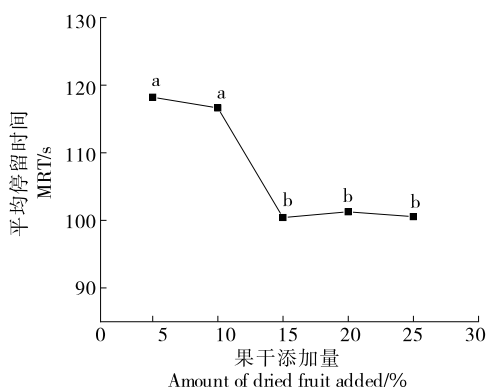


小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 10 水分含量对挤压猕猴桃肉干平均停留时间的影响
Figure 10 Effect of moisture content on mean residence time of extruded kiwifruit pork jerky

挤压物料水分的增加,物料在机筒内的流动状态趋向于混合流^[21],提高水分使物料在机筒内的混合程度增加,使平均停留时间增大。

2.4.4 果干添加量 如图 11 所示,随着猕猴桃果干添加量的增大,平均停留时间呈降低趋势,变化范围在 100.44~118.30 s,当添加量达到 15% 后平均停留时间变化趋势较缓。结果表明,适当增加猕猴桃果干能够使平均停留时间降低,当添加量达到 15% 后对挤压肉干在机筒内的停留时间无显著影响,挤压复合肉干过程中猕猴桃果干的添加量对停留时间的影响较其他因素小。结合图 7 可知,在不同果干添加量下维生素 C 损失率与平均停留时间变化趋势保持一致。苏婕妤^{[6]30}对挤压复合肉干研究表明,随刺梨添加量的增多,平均停留时间存在波动,总体呈降低的趋势。魏益民等^{[8]270}对小米—豆粕复合挤压的研究表明,物料配比对平均停留时间影响不显著。试验结果是对前人复合挤压相关研究的证实与补充。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 11 果干添加量对挤压猕猴桃肉干平均停留时间的影响

Figure 11 Effect of dried fruit addition on mean residence time of squeezed kiwifruit pork jerky

2.5 维生素 C 损失动力学分析

2.5.1 反应级数 通过示踪剂法测定得到不同猕猴桃果干添加量下挤出物中的维生素 C 含量,根据式(9)对数据进行线性拟合,所得直线的斜率即为猕猴桃肉干挤压过程中维生素 C 损失的反应级数。如图 12 所示,直线斜率为 0.940 9,因此认为维生素 C 损失反应级数为一级。对于一级反应,反应程度只与物料在机筒内的反应时间有关,而与反应的混合程度无关。

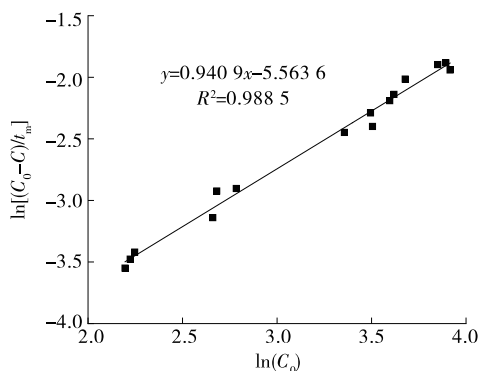


图 12 维生素 C 损失的反应级数

Figure 12 Reaction order of vitamin C loss

2.5.2 速率常数 由于维生素 C 损失的反应遵循一级动力学模型,因此根据式(10)对各挤压条件下的速率常数进行计算,所得结果如表 1 所示,不同试验因素下的速率常数 k 在 0.003 56~0.006 80 s⁻¹,机筒温度、螺杆转速对维生素 C 损失的速率常数影响较为显著,物料水分含量与猕猴桃果干添加量对速率常数 k 的影响不显著。机筒温度与平均停留时间呈负相关,与速率常数 k 呈正相关。

魏益民等^{[8]273-279}研究发现,挤压小米—豆粕中有效赖氨酸损失的速率常数 k 为 0.000 41~0.001 26 s⁻¹;Ilo 等^[22]研究表明,挤压玉米糝中有效赖氨酸损失的速率常

表 1 不同挤压条件下维生素 C 损失的速率常数[†]
Table 1 Rate constant of vitamin C loss under different extrusion conditions

因素	单位	水平	平均停留时间/s	k/s^{-1}
机筒温度	℃	110	105.61±1.99 ^a	0.003 56±0.000 08 ^c
		130	103.79±1.81 ^a	0.004 63±0.000 37 ^b
		150	100.44±1.60 ^b	0.005 08±0.000 45 ^b
		170	99.77±1.09 ^b	0.005 25±0.000 71 ^b
		190	99.59±1.31 ^b	0.006 80±0.000 67 ^a
螺杆转速	r/min	115.2	107.68±1.35 ^a	0.006 28±0.000 31 ^a
		129.6	103.77±1.59 ^b	0.006 06±0.000 26 ^a
		144.0	100.44±1.60 ^c	0.005 08±0.000 45 ^b
		158.4	91.82±1.18 ^d	0.005 21±0.000 40 ^b
		172.8	86.45±0.75 ^e	0.004 94±0.000 47 ^b
水分含量	%	33	88.88±3.10 ^c	0.005 00±0.000 85
		36	92.73±3.15 ^c	0.005 27±0.000 76
		39	100.44±1.60 ^b	0.005 08±0.000 45
		42	101.29±2.30 ^a	0.006 31±0.000 86
		45	100.58±3.21 ^b	0.005 83±0.000 20
果干添加量	%	5	118.30±1.75 ^a	0.004 24±0.000 24
		10	116.71±1.17 ^a	0.004 29±0.000 53
		15	100.44±1.60 ^b	0.003 70±0.000 10
		20	101.29±2.42 ^b	0.003 68±0.000 45
		25	100.58±1.37 ^b	0.003 67±0.000 25

[†] 同一因素不同水平之间小写字母不同表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

数 k 为 $0.012\sim 0.073\text{ s}^{-1}$;程芬^[23]研究表明,蒜薹在 $70\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 油炒过程中维生素 C 损失的速率常数 k 为 $0.012\sim 0.341\text{ s}^{-1}$,上述结果与试验结果均有差别,可能是试验材料的差别及热处理过程不同所致的。

2.5.3 机筒温度对维生素 C 损失速率的影响 由图 13 可知,机筒温度 T 与速率常数 k 的关系遵循 Arrhenius 方程,因此以 $1/T$ 为横坐标, $\ln k$ 为纵坐标,通过线性拟合得出机筒温度与速率常数变化的相互关系,根据直线的斜率和截距可分别计算出反应的活化能 E_a 和指前因子 k_0 ,通过计算得到活化能 $E_a=10.48\text{ kJ/mol}$,指前因子 $k_0=0.097\text{ 7 s}^{-1}$,由此可对机筒温度与维生素 C 的损失速率关系进行合理的评估。

研究发现,在 $70\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 树番茄汁热处理过程与 $120\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高水分挤压过程中,维生素 C 热降解的活化能分别为 $41.27, 18.06\text{ kJ/mol}$ ^{[6]34—35[24]},婴幼儿配方奶粉冲调过程中维生素 C 的反应活化能为 12.04 kJ/mol ^[25],与试验结果相近。

2.5.4 维生素 C 损失率预测模型构建 以果干添加量、机筒温度、螺杆转速、水分含量为自变量,挤压过程中维生素 C 损失率为因变量进行多元线性回归分析。得到

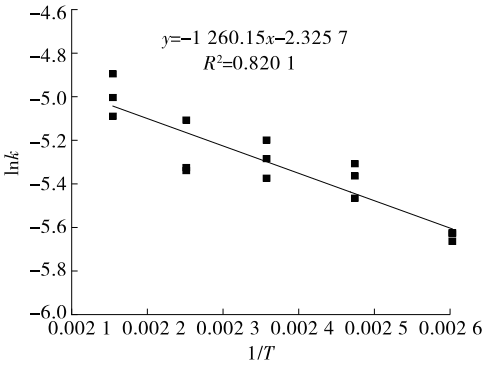


图 13 机筒温度对维生素 C 损失的 Arrhenius 图
Figure 13 Arrhenius plot of barrel temperature on vitamin C loss

4 个不同挤压工艺对维生素 C 损失率的影响,通过 SPSS 多元线性回归分析建立回归方程,实现对挤压过程中营养物质损失规律进行合理的预测。对数据进行方差分析如表 2 所示,显著性 $P<0.05$ ($P=0.006$),表明因变量和自变量之间存在线性相关,此回归模型具有显著的统计学意义。

显著性检验结果及回归系数如表 2 和表 3 所示,果干添加量的显著性检验结果大于 0.05 ,因此,挤压过程中猕猴桃果干的添加量不能显著预测挤出物中维生素 C 的损失率 ($P=0.438$),机筒温度、螺杆转速、水分含量的显著性检验结果均小于 0.05 ,均能对维生素 C 损失率进行有效预测。不同挤压条件对维生素 C 损失率 R_L 的回归模型如式(12)所示。

$$R_L = [0.091(T_B) - 0.260(R_S) + 1.270(M_C)] \times 100\%, \quad (12)$$

表 2 方差分析[†]

Table 2 Analysis of variance

模型	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
回归	444.171	4	111.043	5.550	0.006
残差	300.115	15	20.008		
总计	744.286	19			

[†] 因变量:维生素 C 损失率;预测变量:(常量),水分含量,螺杆转速,机筒温度,果干添加量。

表 3 回归系数表[†]

Table 3 Table of regression coefficients

变量	系数	标准误	标准化系数	显著性	VIF
常数项	3.377	25.880		0.898	
果干添加量	-0.226	0.283	-0.131	0.438	1.000
机筒温度	0.191	0.071	0.442	0.017	1.000
螺杆转速	-0.260	0.098	-0.435	0.018	1.000
水分含量	1.270	0.471	0.442	0.017	1.000

[†] 因变量:维生素 C 损失率。

式中:

R_L ——维生素 C 损失率, %;

T_B ——机筒温度, °C;

R_s ——螺杆转速, r/min;

M_C ——水分含量, %。

在不同机筒温度、螺杆转速、水分含量条件下, 根据预测模型多项式回归方程式 (12), 即可计算不同挤压条件下的维生素 C 损失率。

通过得到的预测模型, 可在不进行实际试验的前提下, 通过上述多项式回归方程对不同机筒温度、螺杆转速条件进行计算, 得到该条件下挤压过程中维生素 C 的损失率, 对肉干挤压过程维生素 C 损失率变化进行合理的推断, 为挤压由“黑箱”转化为“白箱”提供理论支撑, 同时也能降低试验成本。

3 结论

在挤压猕猴桃猪肉干过程中, 增大机筒温度和水分含量、降低螺杆转速和果干添加量会使挤出物维生素 C 损失率增大。通过对平均停留时间的研究发现, 除机筒温度外, 不同挤压条件下的维生素 C 损失率与平均停留时间变化规律均保持一致, 说明机筒温度和平均停留时间是影响挤压过程中维生素 C 变化的关键原因。动力学分析结果表明, 挤压肉干过程中维生素 C 的损失遵循一级动力学模型。维生素 C 损失率预测模型的构建, 可以实现不同挤压过程的维生素 C 损失率变化规律的合理预测, 有助于降低生产试验成本, 指导生产实践。但研究中的预测模型仅处于初步构建阶段, 后期将在此预测模型的基础上, 建立多种挤压条件下肉干营养物质损失的数据库 (如挤压物料中添加的淀粉、植物蛋白的性质对挤出物品质的影响等方面), 进一步完善挤压过程营养物质损失的预测模型, 提高预测模型的性能及普适性。

参考文献

- [1] WANG T, REN Y L, ZHAO J, et al. Identification of pathogens and laboratory activity test of kiwifruit rot disease in Guizhou Province, China[J]. Journal of Chemistry, 2022, 2 022: 1-7.
- [2] MA T T, LAN T, GENG T H, et al. Nutritional properties and biological activities of kiwifruit (actinidia) and kiwifruit products under simulated gastrointestinal in vitro digestion [J]. Food & Nutrition Research, 2019, 63: 1 674.
- [3] LEONTOWICZ H, LEONTOWICZ M, LATOCHA P, et al. Bioactivity and nutritional properties of hardy kiwi fruit actinidia arguta in comparison with actinidia deliciosa 'Hayward' and actinidia eriantha 'Bidan'[J]. Food Chemistry, 2015, 196: 281-291.
- [4] PALANISAMY M, TÖPFL S, BERGER R G, et al. Physico-chemical and nutritional properties of meat analogues based on Spirulina/lupin protein mixtures[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(9): 1 889-1 898.

- [5] SANDOVAL M J L, OSEN R, HIERMAIER S, et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high-moisture extrusion of meat substitutes [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 242: 8-20.
- [6] 苏婕妤. 肉干挤压品质变化动力学及其取向机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
SU J Y. Study on the kinetics of extrusion quality change of Jerky and its orientation mechanism [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [7] 吕庆云, 郭吉, 贾喜午, 等. 双螺杆挤压过程中物料成分对其停留时间分布影响的研究 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31 (5): 141-146.
LU Q Y, GUO J, JIA X W, et al. Study on the influence of material composition on the distribution of residence time during twin-screw extrusion[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(5): 141-146.
- [8] 魏益民, 杜双奎, 赵学伟. 食品挤压理论与技术: 上卷[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
WEI Y M, DU S K, ZHAO X W. Food extrusion theory and technology: volume I[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009.
- [9] 赵学伟, 魏益民, 康立宁. 食品挤压过程的分析方法: II 动力学分析、相变分析[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(3): 121-126.
ZHAO X W, WEI Y M, KANG L N. Analytical methods for food extrusion process: II kinetic analysis, phase transformation analysis [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24 (3): 121-126.
- [10] RUMM-KERUTER D, DEMMEL I. Comparison of vitamin losses in vegetables due to various cooking methods [J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 1990, 36(4): S7-S15.
- [11] 金鑫. 植物蛋白挤压组织化性质、工艺优化及应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021: 57.
JIN X. Study on the extrusion properties, process optimization and application of textured plant protein [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021: 57.
- [12] STEWART ANDERSON J, SUNDERLAND R. Effect of extruder moisture and dryer processing temperature on vitamin C and E and astaxanthin stability[J]. Aquaculture, 2002, 207(1/2): 137-149.
- [13] RIAZ M N, ASIF M, ALI R. Stability of vitamins during extrusion [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 4(49): 361-368.
- [14] QIAO H Z, SHAO H M, ZHENG X J, et al. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion [J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127522.
- [15] FERAWATI F, ZAHARI I, BARMAN M, et al. High-moisture meat analogues produced from yellow pea and faba bean protein isolates/concentrate: effect of raw material composition and extrusion parameters on texture properties [J]. Foods, 2021, 10 (4): 843.

(下转第 96 页)

- 29(12): 112-115.
- [8] 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 李强, 雒建斌, 译. 北京: 清华大学出版社, 2011: 46-54.
- POPOV V L. Contact mechanics and friction physical and applications[M]. LI Q, LUO J B, Translate. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 46-54.
- [9] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 356-378.
- PU L G, CHEN G D, WU L Y. Machine design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 356-378.
- [10] 陈伟超, 曹海军, 陈伟. 胶辊砻谷机主轴的设计与优化[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(5): 80-82.
- CHEN W C, CAO H J, CHEN W. Design and optimization of the main shaft of rubber roller husker[J]. Cereal & Food Industry, 2017, 24(5): 80-82.
- [11] 刘江平, 金心怡. 基于模糊控制的岩茶做青系统设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 93-97.
- LIU J P, JIN X Y. Design of rock tea manipulation system based on fuzzy control[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 93-97.
- [12] 李林. 一种基于 VB、MATLAB 混合编程实现的民用喷气飞机飞行性能计算软件[J]. 软件导刊, 2011, 10(11): 20-21.
- LI L. A civil jet aircraft flight performance calculation software for mixed programming implementation based on VB and MATLAB[J]. Software Guide, 2011, 10(11): 20-21.
- [13] 李阳, 曹宪周, 王明旭, 等. 基于 ADAMS 的胶辊砻谷机砻谷过程仿真及工作参数优化[J]. 粮食与饲料工业, 2019(9): 4-7.
- LI Y, CAO X Z, WANG M X, et al. The simulation of husking process and optimization of working parameters of rubber roll husker based on ADAMS[J]. Cereal and Feed Industry, 2019(9): 4-7.
- [14] 邵小康, 林颢, 王卓, 等. 便捷式智能化大米新鲜度检测系统设计与应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 45-52.
- SHAO X K, LIN H, WANG Z, et al. Design and application of portable intelligent rice freshness detection system[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 45-52.
- [15] 周劲, 刘爽, 苗青. 基于工业物联网技术的稻谷加工系统研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 93-98.
- ZHOU J, LIU S, MIAO Q. Research on paddy processing system based on industrial internet of things[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 93-98.
- [16] 郑翠红. 胶辊砻谷机性能参数优化设计的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012: 8-24.
- ZHENG C H. Study on optimal design of performance parameters of rubber roller husker [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012: 8-24.
- [17] PRABHAKARAN P, RANGANATHAN R, KUMAR V, et al. Review on parameters influencing the rice breakage and rubber roll wear in sheller[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2017, 62(3): 1 875-1 880.
- [18] 伍毅, 阮竞兰, 伍维维, 等. 胶辊砻谷机工作参数配置优化研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 182-186.
- WU Y, RUAN J L, WU W W, et al. Research on optimizing working parameters configuration of rubber roll husker[J]. Food & Machinery, 2013, 29(3): 182-186.
- (上接第 18 页)
- [16] KUMAR A, GANJYAL G, JONES D, et al. Digital image processing method for measuring the residence time distribution in a plasticating extruder[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 2(75): 237-244.
- [17] 赵学伟. 小米挤压加工特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006: 111.
- ZHAO X W. Research on the extrusion processing characteristics of millet[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2006: 111.
- [18] 王少峰, 张媛, 刘美莲, 等. 不同温度状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 71-74.
- WANG S F, ZHANG Y, LIU M L, et al. Flow pattern distribution of meshing counter rotating twin screw extruders at different temperatures[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 71-74.
- [19] LI Y, LI D D, CHENG H D, et al. Morphology, rheological, thermal, and mechanical properties of high-density polyethylene toughened by propylene-ethylene random copolymers[J]. Colloid and Polymer Science, 2023, 301(2): 117-126.
- [20] NWABUEZE T U, IWE M O. Residence time distribution (RTD) in a single screw extrusion of african breadfruit mixtures[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(1): 135-145.
- [21] XU E B, WU Z Z, LI J P, et al. Residence time distribution for evaluating flow patterns and mixing actions of rice extruded with thermostable α -amylase[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(6): 1 015-1 030.
- [22] ILO S, BERGHOFER E. Kinetics of lysine and other amino acids loss during extrusion cooking of maize grits[J]. Journal of Food Science, 2006, 2(68): 496-502.
- [23] 程芬. 烹饪火候控制及后处理对食品食用品质的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019: 34-36.
- CHENG F. Effect of cooking "huohou" control and post processing on edible quality[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019: 34-36.
- [24] ORDÓÑEZ-SANTOS L E, GIRÓN J M. Thermal degradation kinetics of carotenoids, vitamin C and provitamin A in tree tomato juice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 55(1): 201-210.
- [25] 刘奕博. 婴幼儿配方奶粉中维生素 C 稳定性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013: 47.
- LIU Y B. Study on stability of vitamin C in infant formulas[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2013: 47.