

## 微酸性电解水浸渍对天麻鲜切片贮藏品质影响的动力学研究

邓秋秋, 庞文婷, 亢凯杰, 高晴, 和劲松

### Kinetic Study on the Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Immersion on the Storage Quality of Fresh *Gastrodia elata* Slices

DENG Qiuqiu, PANG Wenting, KANG Kaijie, GAO Qing, and HE Jinsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010148>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 微酸性电解水处理对野生菌贮藏品质的影响

Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Treatment on Storage Quality of Fresh Wild Fungus

食品工业科技. 2020, 41(22): 281-289 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030077>

#### 微酸性电解水杀菌工艺优化及对云南鲜米线贮藏品质影响

Optimization of the Sterilization Process of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Its Effect on the Storage Quality of Yunnan Fresh Rice Noodles

食品工业科技. 2021, 42(1): 204-210 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030389>

#### 超声波协同微酸性电解水对小龙虾净化及品质的影响

Effect of Ultrasonic and Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Purification and Quality of Crayfish

食品工业科技. 2021, 42(21): 182-189 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020092>

#### 微酸性电解水结合钙处理对采后桃果实组织结构及水分迁移的影响

Effect of slightly acidic electrolyzed water in combination with Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> on tissue structure and water mobility of peach fruit during storage

食品工业科技. 2017(18): 279-284 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.053>

#### 强酸性电解水降解对硫磷动力学模型及降解产物

Kinetic model and pathway of parathion degraded by electrolyzed oxidizing water

食品工业科技. 2018, 39(12): 63-68 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.12.012>

#### 微酸性电解水冰对牛肉保鲜及抗氧化效果的影响

Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Ice on Beef Fresh-keeping and Antioxidant Activity

食品工业科技. 2020, 41(13): 284-288 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.045>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

邓秋秋, 庞文婷, 亢凯杰, 等. 微酸性电解水浸渍对天麻鲜切片贮藏品质影响的动力学研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 303-310. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010148

DENG Qiuqiu, PANG Wenting, KANG Kaijie, et al. Kinetic Study on the Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Immersion on the Storage Quality of Fresh *Gastrodia elata* Slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 303-310. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010148

· 贮运保鲜 ·

# 微酸性电解水浸渍对天麻鲜切片贮藏品质影响的动力学研究

邓秋秋, 庞文婷<sup>+</sup>, 亢凯杰, 高 晴, 和劲松<sup>\*</sup>  
(云南农业大学食品科学技术学院, 云南昆明 650201)

**摘要:**为探明微酸性电解水 (slightly acidic electrolyzed water, SAEW) 浸渍处理对天麻鲜切片贮藏品质影响的动力学规律, 以未处理组作为对照, 选取料液比 1:1、1:3、1:5 g/mL, 将 SAEW 浸渍处理天麻鲜切片, 在 4 °C 储藏过程中测定其理化、营养指标, 并建立品质衰变动力学模型系统。结果表明, SAEW 浸渍能有效抑制褐变度、褐变率和腐败的发生, 28 d 时, 未处理组、料液比 1:1、1:3、1:5 组菌落总数分别为: 8.25、5.11、5.13、5.10 lg CFU/g; 维生素 C 含量为 4.42、5.66、4.79、4.79 mg/100 g; 天麻素含量为 0.25%、0.24%、0.24%、0.24%。动力学拟合结果表明, SAEW 浸渍处理天麻鲜切片的菌落总数指标变化规律符合 Logistic 模型; 水分活度指标变化规律符合 Expdec2 模型; 褐变度、褐变率、腐烂指标、天麻素和维生素 C 等指标变化规律符合动力学模型系统, 决定系数  $R^2$  均大于 0.8, 拟合性良好; 此外经过 SAEW 浸渍处理的天麻鲜切片, 其褐变度、褐变率、腐烂指标和菌落总数得到有效抑制, 天麻素、维生素 C 含量的衰减速度被延缓。相关结果能为 SAEW 浸渍在鲜品贮藏过程中的应用提供技术指导。

**关键词:**微酸性电解水, 天麻鲜切片, 贮藏品质, 动力学

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0303-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010148



本文网刊:

## Kinetic Study on the Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Immersion on the Storage Quality of Fresh *Gastrodia elata* Slices

DENG Qiuqiu, PANG Wenting<sup>+</sup>, KANG Kaijie, GAO Qing, HE Jinsong<sup>\*</sup>

(School of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** For the purpose of demonstrating the kinetics of immersion in slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on the storage quality of fresh-cut *Gastrodia elata* slices. Pretreated fresh-cut slices of *Gastrodia elata* were dipped in SAWE at solid-liquid ratios of 1:1, 1:3, 1:5 g/mL, and stored at 4 °C for comparison with the untreated group. Establish a quality decay dynamics model system based on a 28-day storage observation experiment, recording and analyzing its physical, chemical and nutritional indicators. SAEW impregnation significantly inhibited browning rate, browning degree, and spoilage occurrence. The total number of colonies in the untreated group, the solid-liquid ratio 1:1, 1:3, and 1:5 groups were 8.25, 5.11, 5.13, and 5.10 lg CFU/g, the vitamin C content was 4.42, 5.66, 4.79, and 4.79 mg/100 g, and the gastrodin content was 0.25%, 0.24%, 0.24%, 0.24%. By kinetic fitting, the variation law of the total number of colonies of *Gastrodia elata* fresh slices by SAEW immersion treatment conformed to the Logistic model. The water activity index change law was derived using Expdec2. The indicator variation rules were derived from the dynamic model system, and  $R^2$  was greater than 0.8, which indicated a good match between indicators. Moreover, SAEW dip treatment effectively suppresses browning,

收稿日期: 2023-02-01 +并列第一作者

基金项目: 国家自然科学基金 (32060573, 31860474); 云南省重大科技专项 (202202AE090019, 202002AA1000052)。

作者简介: 邓秋秋 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 1226301372@qq.com。

庞文婷 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品安全, E-mail: 2761030963@qq.com。

\* 通信作者: 和劲松 (1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品非热加工与安全控制, E-mail: hejinsong1970@qq.com。

browning rate, rot index, and the total number of colonies of *Gastrodia elata* fresh slices, and gastrodin and vitamin C content were slowed. For application of SAEW dipping in the storage of fresh-cut products, the relevant results might provide technical guidance.

**Key words:** slightly acidic electrolyzed water; fresh section of *Gastrodia elata*; storage quality; kinetics

天麻(*Gastrodia elata*),又名赤箭、独摇芝、离母等,为兰科天麻属植物,立冬后至次年清明前采挖(以冬麻为好),是著名的中药材,早在二千多年前就已入药,以云南昭通产者为优。2020年,天麻被列入食药物质目录<sup>[1]</sup>,这意味着天麻在食品方面将会有更多的发展。目前天麻深加工技术缺乏,结合天麻的特性,市场主要以干制的初加工天麻为主进行销售。作为干制的天麻食品,丧失了其感官品质和口感要求,无法满足消费者的需求。鲜食天麻产品市场需求扩大,这为天麻产品的开发提供新的方向,鲜切天麻产品成为天麻产品开发新的方向。天麻鲜品具有很高的营养价值和功效,但天麻鲜品不耐贮藏,极易腐烂,常温一般只能存放 3~5 d<sup>[2]</sup>。天麻鲜切片接触外界又容易造成褐变、腐败等不利影响,同时造成品质的衰变。针对天麻的品质特性将天麻鲜切片贮藏过程中的关键问题分为内部因素:自身代谢活动,如褐变;外部因素:微生物污染。现有的天麻鲜切片储藏手段成本高、添加剂使用造成潜在风险,为减缓天麻鲜切片在储藏过程中外观品质以及功效物质的衰变速度<sup>[2]</sup>,所以急需一种初加工的天麻鲜切片保真工艺。

近些年来,微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)被应用到许多领域,在食品领域也有涉及,具有瞬时、广谱、高效、安全、无残留等杀菌特点,且对皮肤无刺激性,已于2002年6月被日本厚生劳动省认定为食品添加物<sup>[3]</sup>。Park等<sup>[4]</sup>、Issazacharia等<sup>[5]</sup>、Okanda等<sup>[6]</sup>、唐志龙等<sup>[7]</sup>发现SAEW能有效抑制或杀灭鲜切果蔬表面的病原性微生物。目前国内外关于SAEW的研究主要集中在杀菌效果、杀菌机理以及贮藏条件的探讨,对杀菌过程的动力学分析鲜有报道<sup>[8]</sup>。此外部分学者系统研究了SAEW对各类微生物的杀灭作用,但SAEW对食材品质的影响未作深入探讨<sup>[9]</sup>。本实验将利用SAEW新的使用方式(长期浸渍)对天麻鲜切片进行处理,研究浸渍过程中天麻鲜切片的品质衰变情况,探讨SAEW浸渍对天麻鲜切片的保真工艺效果。

本实验建立了用于直接表征褐变度的测定方法,经过方法学论证准确、可靠,可用于直接表征褐变度,可作为天麻鲜切片的褐变情况评判标准;其次是将电解水以长期浸渍的方法进行天麻鲜切片处理,能持续性对天麻鲜切片进行作用,减缓品质衰变速度。因此本文探讨了SAEW浸渍处理对天麻鲜切片贮藏品质的影响因素及其变化规律,在此基础上对天麻鲜切片理化指标及营养指标进行动力学分析。动力学模型系统可对贮藏过程中任一时期的指标变化情况进行实时监控,相关结果可对天麻鲜切片贮藏过

程品质变化趋势预测提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜天麻(冬麻) 云南省昭通市彝良县小草坝,采购后在4℃条件下贮藏备用;氯化钠、盐酸、硫代硫酸钠、苯酚、葡萄糖等分析纯、乙腈(色谱纯) 天津市风船化学试剂科技有限公司;乙醇 分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

HD-240LSAEW生成机 上海旺旺集团;PL303分析天平 上海梅特勒-托利多仪器有限公司;YXQ-SG41-280A高压蒸汽灭菌锅 上海生银医疗仪器仪表有限公司;HPX-9272ME数显电热培养箱 上海博讯实业有限公司医疗设备厂;JJCJ-CJ-1FD超洁净工作台 苏州市金净净化设备科技有限公司;HC-2062高速离心机 安徽中科中佳科技仪器有限公司;HH-6电热恒温水浴锅 常州市普达科学仪器有限公司;UV-1800紫外可见分光光度计 翱艺仪器上海有限公司;UItiMate3000高效液相色谱 安捷伦科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 SAEW的制备 SAEW采用HD-240LSAEW生成机制成;通过电流的变化,可以反映出SAEW中有效氯浓度(ACC)的变化,采用碘量法<sup>[10]</sup>测定有效氯浓度。

1.2.2 样品处理 将试样新鲜天麻用自来水洗净、擦干后进行削皮切片,之后用圆柱形模具压片成直径3 cm,厚度5 mm。首先,精密称取1 g天麻装入15×22 cm真空密封袋,按料液比(1:1、1:3、1:5 g/mL)加入参数为有效氯浓度30.2 mg/L,水流速度4.0 L/min,电流1.3 A的SAEW溶液,分组,每组设三个平行。其次,精密称取150 g天麻装入15×22 cm真空密封袋,记为未处理组。最后,将各天麻样品置于4℃冷库中进行保藏,每4 d换同参数SAEW溶液(保证有效氯浓度保持在一定范围)并取样进行各指标测定,每组3个平行样,取平均值。

1.2.3 腐烂指数的测定 按料液比(1:1、1:3、1:5 g/mL)、未处理分组,称取50 g左右天麻鲜切片装入真空密封袋,每组设3个平行,于4℃冷库储藏;每4 d换水一次。测定腐烂指数时,取出鲜切片擦干表面水分,整齐放置在白纸上于同一高度拍照,每个样品测定一次。使用ImageJ软件处理。按照公式(1)计算:

$$\text{腐烂指数} = \frac{\sum(\text{腐烂级数} \times \text{该级别切片数})}{\text{最高腐烂级别} \times \text{总切片数}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

腐烂级别分级依据表 1<sup>[11]</sup>。

表 1 腐烂分级标准  
Table 1 Rot grading standard

腐烂级别	评判标准
0级	切片完好,无任何病斑,可售。
1级	切片腐烂面积5%,出现1~2个病斑在天麻表面、硬度基本不变,可售。
2级	切片腐烂面积6%~15%,表面出现多个病斑点,斑点面积变大、软化,表面有较少面积长白毛。
3级	切片腐烂面积16%~25%。
4级	腐烂面积达到25%以上。

## 1.2.4 褐变度的测定

1.2.4.1 方法建立 褐变度方程的建立:以天冬酰胺和葡萄糖作为原料,用 pH6.8 的磷酸盐缓冲溶液分别配制 1 mol/L 的葡萄糖溶液和 0.2 mol/L 的天冬酰胺溶液,取等摩尔比的葡萄糖溶液与天冬酰胺溶液于 20 mL 耐热试管中密封。在 140 °C 下油浴中分别加热 5、10、15、20、25、30 min。将反应液稀释 15 倍后利用分光色差仪测定  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,同时于 420 nm 处测定其吸光度(A),并计算褐变度(BD): $BD=10 \times A$ 。每个样品 3 个平行样,取平均值。利用 Box-Behnken Design,以  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  作为三因素,褐变度作为响应值,建立褐变度方程式。

方法论证:分别配制 0.111、0.118、0.125、0.133、0.143、0.154、0.167、0.182、0.200、0.222 mg/mL 的褐色素溶液。以蒸馏水为空白对照(校零),于 420 nm 处测定吸光度,计算 BD 值,以浓度为横坐标 x,褐变度为纵坐标 y,绘制标准曲线。并利用分光色差仪检测  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,将  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值分别代入褐变度方程式中计算 BD 值。分析以吸光度计算的 BD 值与  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值计算的 BD 值间的差异性及两者在变化趋势上的差异性。

1.2.4.2 色差测定 将不同分组样品的三个平行各取一片擦干后放置于白纸上,使用 CR-400 色差计,采用国际照明委员会(Commission Internationale de L'Eclairage, CIE)的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  色彩空间对色差进行测定。测试时,首先让仪器充分预热,用仪器自带的白板校正后,对样品进行测定。每组三个平行,记录记录  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,取平均值。 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  分别表征了样品的黑白度、红绿度和黄蓝度,与参考点比较时  $\Delta L^*$  为正代表白度增加,  $\Delta L^*$  为负代表黑度增加,  $\Delta a^*$  为正代表红色增加,  $\Delta a^*$  为负代表绿色增加,  $\Delta b^*$  为正代表黄色增加,  $\Delta b^*$  为负代表蓝色增加。将  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  带入褐变度方程计算。

1.2.5 褐变率的测定 按料液比(1:1、1:3、1:5 g/mL)、未处理进行分组,称取 50 g 左右天麻鲜切片装入真空密封袋,每组设 3 个平行,于 4 °C 冷库储藏;每 4 d 换水一次。测定褐变率时,取出鲜切片擦干表面水分,整齐放置于白纸上于同一高度拍照,每个样品测定一次,每组 3 个平行,取平均值。使用 ImageJ 软

件处理。按照公式(2)计算:

$$\text{褐变率}(\%) = \frac{\text{褐变面积}}{\text{切片总面积}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.6 水分活度的测定 按照 GB 5009.238-2016 《食品安全国家标准 食品水分活度的测定》<sup>[12]</sup> 中的水分活度仪扩散法进行测定。25 °C,用饱和氯化钠溶液进行校准(水分活度为 0.753)。取不同分组天麻鲜切片 10 g,剪碎后均匀放置在水分活度仪测试盒中,测试温度 25 °C,测试时间 10 min。

1.2.7 菌落总数的测定 根据国家标准 GB 4789.2-2016 《食品微生物学检验 菌落总数测定》<sup>[13]</sup> 方法。取天麻鲜切片 3 g,立即放入 27 mL 灭菌后的生理盐水中,震荡摇匀;选择  $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$  三个稀释梯度(12 d 后选择  $10^4$ 、 $10^5$ 、 $10^6$ )加入 1 mL 菌液;之后倒入 15~20 mL 平板计数培养基,培养 48 h 后进行读数。

1.2.8 天麻素的测定 参考中国药典法 2015 版一部<sup>[14]</sup>《药材和饮片》中天麻素的测定方法。

1.2.8.1 高效液相色谱(HPLC)分析样品前处理 精密称取 1.0000 g 干燥天麻供试品(70 °C,烘干 6 h),加入烧杯中,按固液比 1:20 g/mL 加入 55% 乙醇保鲜膜密封后,在提取温度 60 °C、提取时间 40 min 下进行超声提取,提取完成后 3000 r/min 离心 5 min、过滤,在 70 °C 下减压浓缩至液体不可流动为止,加 3 mL 乙腈水(3:97)溶解,定容至 5 mL 容量瓶。

1.2.8.2 HPLC 标准曲线的建立 色谱条件:色谱柱 Synchronis C<sub>18</sub>(250×4.6 mm×5 μg);柱温:30 °C;流速:1.0000 mL/min;流动相:乙腈:0.5% 磷酸溶液=3:97;波长:220 nm;进样量:20 μL;进样方式:恒流。

标准曲线的制作:利用外标法测定天麻素的含量:精密称取 17.5 mg 天麻素标准品,用乙腈:水=3:97 溶解,配成 0.35 mg/mL 溶液,稀释成 1.75 mg/mL 标准溶液。取 2 mL 标准溶液于进样瓶中,按进样量 2、3、4、5、6、7 μL 进行天麻素测定。以质量为横坐标,峰面积为纵坐标做标准曲线。

1.2.8.3 HPLC 测样品中天麻素含量 将前处理后配制的溶液吸取 2 mL 注入进样瓶,在标准曲线的条件下测定样品中天麻素含量,mg/100 g。

1.2.9 维生素 C 测定 根据王丽霞<sup>[15]</sup> 碘酸钾法进行测定。取天麻样品 20 g 放入研钵,加入 2% 的 HCl 溶液 5~10 mL,研磨均匀,移至 100 mL 容量瓶用 2% HCl 定容,摇匀并过滤,取 1% KI 溶液 2 mL、10% 淀粉溶液 1~2 mL 及滤液 5 mL 于锥形瓶,加蒸馏水至 10 mL 摇匀,用 0.001 mol/L 的 KIO<sub>3</sub> 溶液滴定。

1.2.10 动力学分析 以未处理组作为对照,选取料液比 1:1、1:3、1:5 g/mL,将天麻鲜切片 SAEW 浸渍处理,在 4 °C 储藏过程中测定其理化、营养指标(每 4 d 测定一次,测定周期为 28 d),并建立品质衰变动力学模型系统。

由于天麻鲜切片在储藏过程中,各指标变化规律存在差异性,单一模型不能使用,故本实验采用多动力学模型配合使用。腐烂指数、褐变率指标使用 Asymptotic1 模型进行拟合,褐变度、天麻素含量、维生素 C 含量指标使用一级反应动力学模型进行拟合,水分活度指标使用 Expdec2 模型进行拟合,菌落总数指标使用 Logistic 模型进行拟合。

### 1.3 数据处理

应用 Origin 软件进行作图与非线性拟合分析, ImageJ 处理图片, Excel 软件进行数据处理,用 SPSS 软件对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 腐烂指数的动力学拟合

由图 1 可知,天麻鲜切片随着储藏时间增加,未处理组天麻鲜切片腐烂率呈上升趋势,而 SAEW 浸渍组均未出现腐烂现象,所以证明 SAEW 浸渍能阻止腐烂现象。根据数据分布形态,对腐烂指数进行一阶动力学方程拟合,未处理组拟合曲线和腐烂指数数据基本重合,Asymptotic1 模型(一阶指数渐进回归模型 1)动力学方程(3)如下:

$$y = a - bc^x \tag{3}$$

式中:  $y$  为腐烂指数(%);  $a$  为渐近线参数;  $b$  为响应范围;  $c$  为衰变速率( $d^{-1}$ );  $x$  为储藏时间( $d$ )。

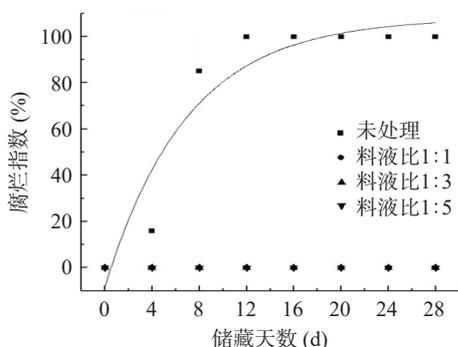


图 1 腐烂指数的一阶指数动力学拟合

Fig.1 First order exponential kinetic fitting of decay index

在拟合曲线中,未处理组的  $a$  为  $108.06 \pm 12.21$ ,  $b$  为  $116.40 \pm 17.38$ ,  $c$  为  $0.87 \pm 0.05$ , 回归系数  $R^2$  为 0.902, 模型预测性良好。

詹苑等<sup>[16]</sup>研究表明,SAEW 处理野生菌不仅能控制其表面微生物增长量,还能减缓贮藏品质的劣变速度。刘培红等<sup>[17]</sup>探讨 SAEW 对鲜米线储藏过程中的杀菌及延长保鲜期的作用,试验组鲜米线保鲜期比对照组延长约 16 h,从而降低了鲜米线腐败变质的速率。结果表明,SAEW 浸渍能阻止天麻鲜切片的腐烂现象,未处理组拟合后回归系数  $R^2$  为 0.902,模型预测性良好,腐烂指数变化符合 Asymptotic1 模型动力学方程(3)的规律。

### 2.2 褐变度的动力学拟合

#### 2.2.1 褐变度方程的建立 利用 Box-Behnken Desi-

gn,以  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 作为三因素,褐变度作为响应值,得到多元一次方程式。按照公式(4)计算:

$$BD = 4.20281 - 0.043528L^* + 0.27518a^* + 0.16055b^* \tag{4}$$

2.2.2 褐变度标准曲线 以褐色素标准品浓度为横坐标,褐变度(BD)为纵坐标,在 420 nm 处测定吸光值。制作褐变度标准曲线。绘制的标准曲线  $y=0.0846+40.6078x$ ,  $R^2=0.999$ ,具有良好的线性关系。

由图 2 可知,经过统计分析,以吸光度计算的 BD 值与  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值计算的 BD 值间不存在差异性 ( $P>0.05$ ),两者在变化趋势上也不存在差异性 ( $P>0.05$ )。说明将测定的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值代入(4)式中计算 BD 值的方法是可靠的,该方法可用来测定固体样品的褐变度值。

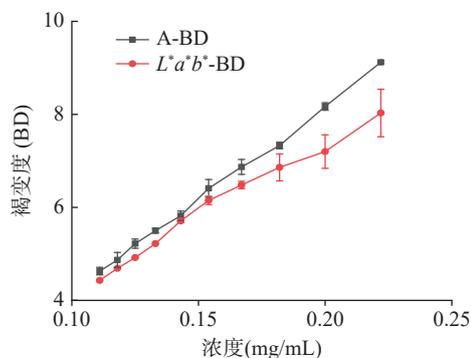


图 2 BD 值两种计算方法对比

Fig.2 Comparison of two calculation methods for BD value

2.2.3 褐变度的动力学拟合 由图 3 中可以看出,通过对褐变度进行一级动力学拟合,拟合曲线和褐变度数据基本重合。一级反应动力学模型<sup>[18]</sup>的方程为:

$$A = A_0 e^{kt} \tag{5}$$

式中:  $A$  为样品贮藏至第  $t$  d 时天麻素含量(%);  $A_0$  为样品的初始天麻素含量(%);  $k$  为样品天麻素含量变化速率常数;  $t$  为样品的贮藏时间( $d$ )。

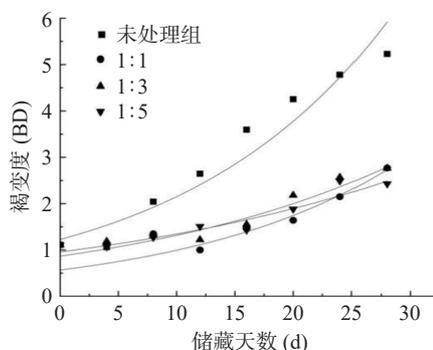


图 3 褐变度的一级动力学拟合

Fig.3 First order kinetic fitting of Browning degree

在拟合曲线中,褐变度呈指数上升;变化速率常数  $k$  反映了褐变度变化,  $k$  越大,褐变度越高。在表 2 中可以看出,未处理组和料液比 1:1g/mL 决定系数

$R^2$  大于 0.9, 有很好的预测效果。通过拟合结果可知, 褐变度变化符合一级动力学模型。

表 2 褐变度一级动力学拟合参数  
Table 2 First order kinetic fitting parameters of browning degree

项目	未处理	料液比1:1 (g/mL)	料液比1:3 (g/mL)	料液比1:5 (g/mL)
k	0.06±0.01	0.06±0.01	0.04±0.01	0.03±0.01
$R^2$	0.965	0.944	0.843	0.885

### 2.3 褐变率的动力学拟合结果

由图 4 可知, 天麻鲜切片随着储藏时间增加, 未处理组褐变率呈上升趋势, 在 12 d 时达到最大值 100%; 料液比 1:1 g/mL 组在 12 d 达到最大值 14.8%, 之后略有下降; 料液比 1:3 g/mL 在 4 和 8 d 出现褐变, 褐变率分别为 0.29% 和 0.11%; 可能是实验过程中造成的误差, 料液比 1:5 g/mL 组未出现褐变。与未处理组相比, SAEW 浸渍能有效抑制天麻鲜切片表面产生褐变现象。将 Asymptotic1 模型(一阶指数渐进回归模型 1)按照动力学方程(3)进行拟合, 拟合曲线与褐变率数据基本重合, 从表 3 中可知, 未处理组决定系数  $R^2$  大于 0.8, 模型预测性良好。

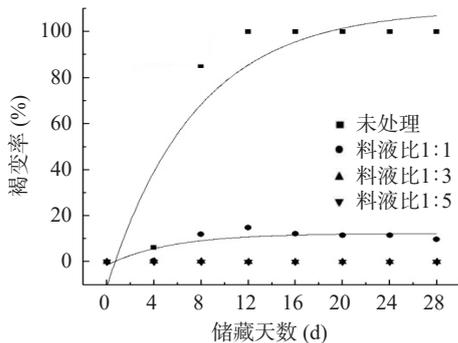


图 4 褐变率的一阶指数动力学拟合

Fig.4 First order exponential kinetic fitting of Browning rate

表 3 褐变率的一阶指数动力学拟合参数

Table 3 First order exponential kinetic fitting parameters of browning rate

不同处理条件	未处理	料液比1:1 (g/mL)	料液比1:3 (g/mL)	料液比1:5 (g/mL)
a	109.70±16.10	12.30±2.1	-	-
b	120.43±21.51	13.72±3.78	-	-
c	0.87±0.05	0.83±0.1	0.88±0.1	0.88±0.1
$R^2$	0.868	0.726	0	0

马赵云等<sup>[19]</sup>研究表明, 利用阿伦尼乌斯方程建立鲜切山药 MDA 含量和褐变度品质指标的一级动力学模型来模拟鲜切山药的货架期模型, 可以更好地反映鲜切山药的品质指标变化。邓清云等<sup>[20]</sup>研究 AEW 对鲜切马铃薯酶促褐变的抑制效果, 发现处理时间、处理方式(静止浸泡、流水冲洗、振荡)对 AEW 的褐变抑制效果均产生影响, 而料液比变化对 AEW 的褐变抑制效果影响不大。与本研究的结论相符。

### 2.4 水分活度的动力学拟合

由图 5 可知, 天麻鲜切片随着储藏时间增加水分活度呈先上升后下降趋势, 在第 8 d 时各组水分活度值达到最大; 未处理组、料液比(1:1、1:3、1:5 g/mL)水分活度分别为 0.931、0.948、0.951、0.952, 不同料液比 SAEW 处理组天麻鲜切片水分活度均高于未处理组, 与未处理相比, SAEW 浸渍天麻鲜切片减缓其水分活度下降速度。通过对水分活度进行二阶指数动力学拟合, 拟合曲线和水分活度数据基本重合, Expdec2 模型(两阶指数增长模型)动力学方程(6)如下:

$$y = y_0 + A_1 e^{x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2} \quad \text{式 (6)}$$

式中:  $y$  为某一时刻的品质指标;  $y_0$  为偏移量;  $A_1$  为第一段曲线振幅;  $t_1$  为第一段曲线时间常数,  $A_2$  为第二段曲线振幅;  $t_2$  为第二段曲线时间常数。

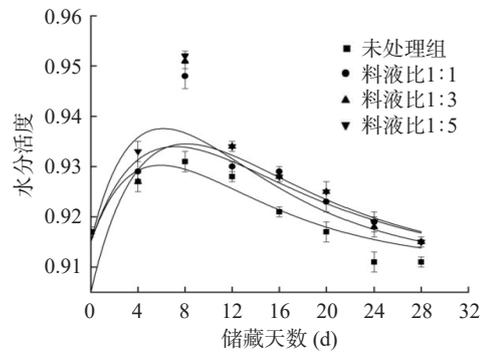


图 5 水分活度二阶动力学拟合

Fig.5 Second order kinetic fitting of water activity

在拟合曲线中, 参数  $t_2$  反映了水分活度降低速度,  $t_2$  值越大水分活度下降变化越快。在表 4 中可以看出, 各分组决定系数  $R^2$  都大于 0.8, 结果表明水分活度变化符合二阶指数增长模型。

表 4 水分活度二阶动力学拟合参数

Table 4 Second order kinetic fitting parameters of water activity

项目	未处理	料液比1:1 (g/mL)	料液比1:3 (g/mL)	料液比1:5 (g/mL)
$t_2$	-6.633±0.154	-7.759±0.124	-7.982±0.126	-6.775±0.131
$R^2$	0.819	0.946	0.898	0.919

陈建福等<sup>[21]</sup>研究表明, SAEW 处理可延缓褐变及总酸度的增加, 减少水分含量的丧失。综上所述, SAEW 浸渍天麻鲜切片减缓其水分活度下降速度, 拟合后各分组决定系数  $R^2$  都大于 0.8, 水分活度变化符合二阶指数增长模型规律。

### 2.5 菌落总数的 Logistic 模型拟合

由图 6 可知, 天麻鲜切片菌落总数随储藏时间延长呈上升趋势, 其中未处理组菌落总数上升趋势远远高于 SAEW 浸渍处理组; 与未处理组相比, SAEW 浸渍能有效抑制微生物, 且与 SAEW 添加量无关。通过对菌落总数进行 Logistic 模型拟合, 拟合曲线和

菌落总数数据基本重合。Logistic 模型能体现产品在贮藏时菌落总数变化与时间的关系<sup>[22]</sup>, Logistic 模型的方程为:

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{X}{X_0}\right)^P} \quad \text{式 (7)}$$

式中: y 为样品贮藏至第 x d 时菌落总数(log CFU/g); A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、x<sub>0</sub>、P 为模型参数; x 为样品的贮藏时间(d)。

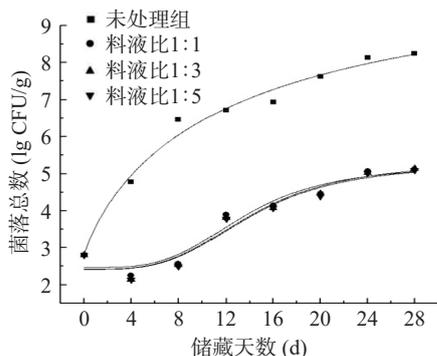


图6 菌落总数的 Logistic 模型拟合  
Fig.6 Logistic model fitting of total bacterial count

在拟合曲线中, 菌落总数呈指数上升。在表 5 中可以看出, SAEW 浸渍组决定系数 R<sup>2</sup> 均大于 0.9, 有很好的预测效果, 结果表明菌落总数变化符合 Logistic 模型。

表5 菌落总数的 Logistic 模型拟合参数  
Table 5 Logistic model fitting parameters of total bacterial count

项目	未处理组	料液比1:1 (g/mL)	料液比1:3 (g/mL)	料液比1:5 (g/mL)
A <sub>1</sub>	2.79±0.29	2.46±0.25	2.42±0.26	2.41±0.27
A <sub>2</sub>	10.96±3.85	5.23±0.57	5.32±0.69	5.27±0.69
X <sub>0</sub>	12.78±14.62	13.51±2.30	14.07±2.71	14.06±2.75
P	0.87±0.42	3.64±2.04	3.49±2.03	3.53±2.12
R <sup>2</sup>	0.985	0.949	0.948	0.944

周智宇等<sup>[23]</sup>研究表明, SAEW 处理能有效控制样品表面微生物数量, 还能减缓贮藏品质的劣变速度。张国治等<sup>[24]</sup>结果表明, 根据不同模型计算微生物生长动力学参数, 所有模型均可以可靠、快速地预测青麦糕的腐败程度, 从而保证青麦糕产品的食用品质和安全。结果表明, 菌落总数变化遵循 Logistic 模型。

### 2.6 天麻素含量的动力学拟合

由图 7 可知, 天麻鲜切片随着储藏时间增加, 天麻素含量均呈逐渐下降趋势; 其中未处理组天麻素含量减少量始终低于 SAEW 浸渍处理组, 储藏效果最好。与未处理组相比, SAEW 浸渍在一定程度上会造成天麻素的损失, 但与 SAEW 添加量无关。天麻素初始含量为 0.38%, 28 d 时, 未处理组、料液比 (1:1、1:3、1:5 g/mL) 天麻素含量分别为 0.25%、

0.24%、0.24%、0.24%。通过对天麻素含量进行一级动力学拟合, 拟合曲线和天麻素含量数据基本重合, 在拟合曲线中, 天麻素含量呈指数下降, 系数 k 反映了天麻素含量变化, k 越大, 天麻素含量降低越快, 证明天麻素含量的降解速度与贮藏时间呈负相关。从表 6 中可以看出, 各分组决定系数 R<sup>2</sup> 均大于 0.9, 有很好的预测效果。

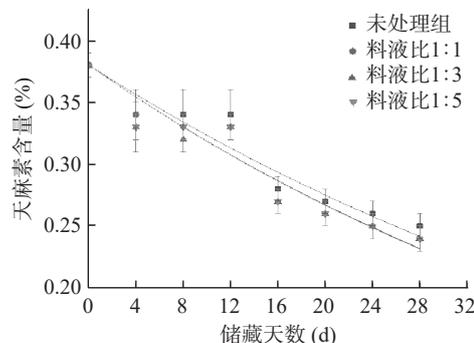


图7 天麻素含量的一级动力学拟合  
Fig.7 First order kinetic fitting of gastrodin content

表6 天麻素含量的一级动力学拟合参数  
Table 6 First order kinetic fitting parameters of gastrodin content

项目	未处理组	料液比1:1 (g/mL)	料液比1:3 (g/mL)	料液比1:5 (g/mL)
k	0.016±7.572	0.018±0.002	0.018±0.001	0.018±0.002
R <sup>2</sup>	0.958	0.940	0.929	0.916

陈琛等<sup>[25]</sup>研究中, 不同保鲜液浸泡贮藏期间天麻素含量呈下降趋势。曹森等<sup>[26]</sup>研究发现, 复合保鲜剂能延缓其天麻素和多糖含量的下降。SAEW 浸渍在一定程度上会造成天麻素的损失, 模型决定系数 R<sup>2</sup> 均大于 0.9, 说明天麻鲜切片在贮藏过程中天麻素含量变化符合一级反应动力学规律。

### 2.7 维生素 C 测定的动力学拟合

由图 8 可知, 天麻维生素 C 随储藏时间增加呈逐渐减少趋势, 并且 SAEW 浸渍组维生素 C 含量均高于未处理组, 与未处理组相比, SAEW 浸渍能在减缓维生素 C 损失。在第 8 d 之前, 四个组间并无明显差异, 在第 8 d 之后, 料液比 1:1 g/mL 组维生素

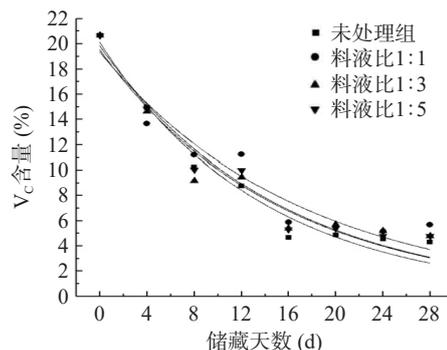


图8 维生素 C 含量的动力学拟合  
Fig.8 Kinetic fitting of V<sub>C</sub> content

C 含量均高于其余三组;并且 SAEW 浸渍组(料液比 1:1、1:3、1:5 g/mL)维生素 C 含量均高于未处理组。

通过对天麻维生素 C 含量进行一级动力学拟合,拟合曲线和天麻维生素 C 含量数据基本重合,在拟合曲线中,维生素 C 含量呈指数下降;变化速率常数  $k$  反映了维生素 C 含量变化速度; $k$  越大,维生素 C 降低越快。从表 7 中可以看出,料液比 1:1、1:3 g/mL 决定系数  $R^2$  大于 0.9,表明方程的拟合精度高,维生素 C 含量变化符合一级动力学模型。

表 7 维生素 C 的动力学拟合参数  
Table 7 Kinetic fitting parameters of  $V_C$

项目	未处理组	料液比1:1 (g/mL)	料液比1:3 (g/mL)	料液比1:5 (g/mL)
$k$	0.056±0.003	0.052±0.003	0.049±0.004	0.044±0.003
$R^2$	0.968	0.929	0.939	0.947

赵德锟等<sup>[27]</sup>研究 SAEW 处理对鲜切云南红梨贮藏过程中品质的影响,结果表明 SAEW 处理能够有效控制云南红梨鲜切品表面微生物数量,并延缓其贮藏过程中维生素 C 含量的衰减。Giannakourou 等<sup>[28]</sup>发现不同贮藏条件下冷冻绿色蔬菜维生素 C 的损失过程也可以用一级动力学模型描述。李敏等<sup>[29]</sup>研究表明大白菜在贮藏过程中维生素 C 降解符合一级反应动力学规律,反应速率常数  $k$  随贮藏温度的增加而增加。综上所述,维生素 C 含量变化符合一级动力学规律。

### 3 结论

通过对 SAEW 浸渍(料液比 1:1、1:3、1:5 g/mL)、未处理组在储藏过程中天麻鲜切片理化指标及营养指标的检测,SAEW 浸渍能有效抑制褐变度、褐变率和腐败的发生;抑制微生物繁殖,同时能延缓水分活度、天麻素、维生素 C 等指标的衰变速度。综上所述,本研究提出的 SAEW 浸渍能有效减缓天麻鲜切片品质衰变速度,可用于解决天麻鲜切片储藏问题;同时建立了 SAEW 浸渍处理对天麻鲜切片的菌落总数、褐变度、褐变率、腐烂指数、水分活度、天麻素和维生素 C 等指标影响模型系统,拟合后决定系数  $R^2$  均大于 0.8,表明方程的拟合精度高,此外通过以上动力学模型可以对天麻鲜切片在不同贮藏时间下的理化及营养指标变化进行动态控制,方便产品质量的监测。相关结果能为 SAEW 在鲜品贮藏过程中的应用提供技术指导。

### 参考文献

[1] 张家琼. 昭通市昭阳区天麻产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技, 2016(17): 78-79. [ZHANG J Q. Current situation and countermeasures of *Gastrodiaelata* industry development in Zhaoyang District, Zhaotong City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016 (17): 78-79.]

[2] 汪植, 容辉, 段和平. 天麻多糖对小鼠免疫功能的影响[J]. 中国民族民间医药杂志, 2007(2): 112-114, 124. [WANG Z, RONG

H, DUAN H P. Effect of *Gastrodiaelata* polysaccharides on immune function of mice[J]. Chinese Journal of Ethnic and Folk Medicine, 2007(2): 112-114, 124.]

[3] HAO J X, LI H Y, WAN Y F, et al. Combined effect of acidic electrolyzed water (ACEW) and alkaline electrolyzed water (ALEW) on the microbial reduction of fresh-cut cilantro[J]. J Food Control, 2015, 50: 699-704.

[4] PARKH, HUNGYC, BRACKETTRE, et al. Antimicrobial effect of electrolyzed water for inactivating *Campylobacter jejuni* during poultry washing[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 72: 77-83.

[5] ISSA-ZACHARIA A, KAMITANI Y, MUHIMBULA H, et al. Antimicrobial effect of slightly acidic electrolyzed water for inactivation of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli* on fresh strawberries (*Fragaria L.*)[J]. African J Microbiol Res, 2010, 4(20): 2174-2180.

[6] OKANDA T, TAKAHASHI R, EHARA T, et al. Slightly acidic electrolyzed water disrupts biofilms and effectively disinfects *Pseudomonas aeruginosa*[J]. J Infect Chemother, 2019, 25(6): 452-457.

[7] 唐志龙, HAMZAH A, 高晴, 等. 微酸性电解水凝胶对天麻鲜切片贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2625-2632. [TANG Z L, HAMZAH A, GAO Q, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water gel on the storage quality of fresh slices of *Gastrodiaelata*[J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2022, 13(8): 2625-2632.]

[8] 叶章颖, 祁凡雨, 裴洛伟, 等. 微酸性电解水对虾仁的杀菌效果及其动力学[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 223-230. [YE Z Y, QI F Y, PEI L W, et al. Sterilization effect of slightly acidic electrolyzed water on shrimp and its kinetics[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 223-230.]

[9] CUI X, SHANG Y, SHI Z, et al. Physicochemical properties and bactericidal efficiency of neutral and acidic electrolyzed water under different storage conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(4): 582-586.

[10] 李富荣. 碘量法测定钠法次氯酸钙中有效氯含量[J]. 无机盐工业, 2002(1): 42-44, 2. [LI F R. Iodometric determination of effective chlorine content in sodium calcium hypochlorite[J]. Inorganic salt industry, 2002(1): 42-44, 2.]

[11] 孙海燕, 马骏, 钟爱民, 等. 不同保鲜包装对天麻贮藏生理和效果的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(12): 329-333. [SUN H Y, MA J, ZHONG A M, et. Effects of different fresh-keeping packages on storage physiology and effect of *Gastrodiaelata*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(12): 329-333.]

[12] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.238-2016 食品安全国家标准 食品水分活度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Regulation. GB 5009.238-2016 National food safety standards Determination of water activity in foods[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.]

[13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 4789.2-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Regulation. GB 4789.2-2016 National standard for food safety Microbiological examination of food Determination of total colony count[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.]

- [14] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 第一部. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 248. [National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. First Edition. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2015: 248.]
- [15] 王丽霞. 测定维生素C的两种方法[J]. 经济林研究, 2001(2): 39-40. [WANG L X. Two methods for determination of vitamin C[J]. Economic Forest Research, 2001(2): 39-40.]
- [16] 詹苑, 高晴, 杨珍, 等. 微酸性电解水处理对野生菌贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 281-289. [ZHAN Y, GAO Q, YANG Z, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water treatment on the storage quality of wild fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 281-289.]
- [17] 刘培红, 陈艾, 高晴, 等. 微酸性电解水对鲜米线杀菌及保鲜效果的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(12): 164-168. [LIU P H, CHEN A, GAO Q, et al. Study on germicidal and fresh-keeping effects of slightly acidic electrolyzed water on fresh rice noodles[J]. Food Industry, 2018, 39(12): 164-168.]
- [18] 巨文华, 刘青梅, 杨性民, 等. 醉泥螺贮藏过程中品质变化的动力学模型研究[J]. 中国食品学报, 2008, 8(5): 70-74. [JU W H, LIU Q M, YANG X M, et al. Study on the dynamic model of the quality change of conch. inebriate during storage[J]. Chinese Journal of Food, 2008, 8(5): 70-74.]
- [19] 马卓云, 于潇潇, 杨舒乔, 等. 冰温贮藏对鲜切山药品质的影响及货架期的预测[J]. 农产品加工, 2021(2): 4-9. [MA Z Y, YU X X, YANG S Q, et al. Effect of ice temperature storage on quality of fresh cut yam and prediction of shelf life[J]. Processing of agricultural products, 2021(2): 4-9.]
- [20] 邓清云, 刘海杰, 张芊. 酸性电解水对鲜切马铃薯酶促褐变抑制效果研究[J]. 食品科技, 2012, 37(10): 35-38. [DENG Q Y, LIU H J, ZHANG Q. Study on inhibition effect of acidic electrolyzed water on enzymatic browning of fresh cut potato[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(10): 35-38.]
- [21] 陈建福, 汪少芸, 林梅西. 海鲜菇中短波红外干燥特性及动力学模型研究[J]. 化学工程, 2020, 48(10): 52-57. [CHEN J F, WANG S Y, LIN M X. Study on drying characteristics and kinetic model of seafood mushroom by medium short wave infrared[J]. Chemical Engineering, 2020, 48(10): 52-57.]
- [22] 赵波, 吴雅薇, 李小龙, 等. 玉米生理成熟后籽粒脱水特性[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 10-17. [ZHAO B, WU Y W, LI X L, et al. Dehydration characteristics of corn grains after physiological maturity[J]. Journal of Jiangsu Agriculture, 2020, 36(1): 10-17.]
- [23] 周智宇, 罗正娅, 高晴, 等. 微酸性电解水杀菌工艺优化及对云南鲜米线贮藏品质影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 204-210. [ZHOU Z Y, LUO Z Y, GAO Q, et al. Optimization of slightly acidic electrolyzed water sterilization process and its effect on the storage quality of Yunnan fresh rice noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 204-210.]
- [24] 张国治, 刘悦, 张康逸, 等. 青麦糕中微生物生长动力学模型及货架期研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 49-55. [ZHANG G Z, LIU Y, ZHANG K Y, et al. Study on microbial growth kinetics model and shelf life of green wheat cake[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 49-55.]
- [25] 陈琛, 蔺蓓蓓, 吴伟, 等. 6种保鲜剂对天麻保鲜效果的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 112-119. [CHEN C, LIN B B, WU W, et al. Effects of 6 preservatives on the fresh-keeping effect of *Gastrodiaelata*[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 47(9): 112-119.]
- [26] 曹森, 赵成飞, 崔世江, 等. 复合保鲜剂对鲜切天麻贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 31-36. [CAO S, ZHAO C F, CUI S J, et al. Effect of compound preservatives on storage quality of fresh cut *Gastrodiaelata*[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 31-36.]
- [27] 赵德锟, 李凌飞, 谭雷姝, 等. 微酸性电解水对鲜切云南红梨贮藏品质影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(1): 243-251. [ZHAO D K, LI L F, TAN L S, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water on storage quality of fresh cut Yunnan red pear[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2017, 8(1): 243-251.]
- [28] GIANNAKOUROU M C, TAOUKIS P S. Kinetic modelling of Vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions[J]. *Food Chemistry*, 2003, 83(1): 33-41.
- [29] 李敏, 熊维. 不同贮藏温度条件下大白菜品质动力学方程分析研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(6): 160-164. [LI M, XIONG W. Analysis and study on quality kinetic equation of chinese cabbage under different storage temperatures[J]. Chinese brewing, 2019, 38(6): 160-164.]