

孙莹, 王龙, 周斌, 等. 大豆蛋白基素肉预制菜贮藏品质分析及其货架期预测 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 300–307. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080254

SUN Ying, WANG Long, ZHOU Bin, et al. Storage Quality Analysis and Shelf Life Prediction of the Prepared Dish of Soybean Protein Artificial Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 300–307. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080254

· 贮运保鲜 ·

大豆蛋白基素肉预制菜贮藏品质分析 及其货架期预测

孙莹¹, 王龙¹, 周斌¹, 朱秀清^{2,*}

(1. 哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028)

摘要: 为满足消费者对营养健康、风味多样的方便食品较高的需求, 以高温挤压大豆蛋白肉为原料开发了传统菜肴宫保鸡丁的仿真预制菜 (The prepared dish Kung Pao Chicken with soy protein artificial meat, SPAM-KPC), 并比较了不同贮藏温度 (4、25 和 37 °C) 下 SPAM-KPC 贮藏品质的变化。以菌落总数为影响产品货架期的关键品质因子, 建立了 SPAM-KPC 的货架期预测模型。结果发现: 三种温度下贮藏 15 d 的 SPAM-KPC 样品菌落总数从 0.67 lg (CFU/g) 分别增长至 2.73、3.37、4.33 lg (CFU/g); pH (从 6.22 分别下降至 5.98、5.87 和 5.69) 和感官得分 (从 25.12 分别下降至 22.67、19.52 和 16.84) 逐渐降低; SPAM-KPC 样品颜色逐渐加深, 硬度和弹性降低。三种贮藏温度下 SPAM-KPC 产品的货架期分别为 28、20 和 17 d。表明 4 °C 低温贮藏是 SPAM-KPC 产品的最佳贮藏温度。本研究为植物基蛋白肉在预制菜加工领域的应用提供了理论参考。

关键词: 大豆蛋白, 植物肉, 预制菜, 贮藏品质, 货架期

中图分类号: TS214.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)14-0300-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080254



本文网刊:

Storage Quality Analysis and Shelf Life Prediction of the Prepared Dish of Soybean Protein Artificial Meat

SUN Ying¹, WANG Long¹, ZHOU Bin¹, ZHU Xiuqing^{2,*}

(1. Tourism & Cuisine, College Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: In this study, the prepared dish Kung Pao Chicken with soy protein artificial meat (SPAM-KPC) was developed to satisfy the higher demand for nutritious healthy and diversified convenience food, and the changes in storage quality of SPAM-KPC at different storage temperatures (4, 25 and 37 °C) were compared. The shelf life prediction model of the SPAM-KPC was established based on the total number of bacteria as the key quality factor affecting the shelf life of the product. The results showed that the total colony count of SPAM-KPC samples stored at three temperatures for 15 days increased from 0.67 lg(CFU/g) to 2.73, 3.37 and 4.33 lg(CFU/g), respectively. While pH (from 6.22 to 5.88, 5.87, 5.69) and sensory scores (from 25.12 to 22.67, 19.52, 16.84) gradually decreased, as well as hardness and springiness decreased. The shelf life of SPAM-KPC products at three storage temperatures was 28, 20 and 17 days, respectively. According to the findings, low-temperature storage at 4 °C was the best storage temperature for SPAM-KPC products. This work could provide a theoretical reference for the application of plant-based protein meat in the field of prepared dishes processing.

Key words: soy protein; plant-based protein meat; prepared dishes; storage quality; shelf life

收稿日期: 2023-08-24

基金项目: 2020 年度哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划 (2020CX01); 黑龙江省自然科学基金联合引导 (LH2022C048)。

作者简介: 孙莹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 烹饪科学, E-mail: sunying625@163.com。

* 通信作者: 朱秀清 (1968-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 蛋白质分子化学及大豆深加工, E-mail: xqzhuwang@163.com。

随着生活节奏的加快,当下社会消费群体对营养健康化、品类多元化和风味创新多样化的方便食品具有较高需求。预制菜是以一种或多种农产品为主要原料,运用标准化流水作业,经预加工(如分切、搅拌、腌制、滚揉、成型、调味等)和预烹调(如炒、炸、烤、煮、蒸等)制成,并进行预包装的成品或半成品菜肴^[1]。近年来,随着生产供应链的完善和消费者接受度的提高,预制菜肴因其食用方便,在快节奏生活的当下极具市场潜力^[1-2]。

植物基肉制品是采用现代食品加工技术,以植物性蛋白为主要原料,通过纺丝、挤压和热剪切等制备技术,加工而成的纤维状仿真肉,具有营养平衡、环境友好和低成本等优势^[3-7]。宫保鸡丁是中式传统名菜,以其红而不辣、鲜香味浓和肉质滑脆等特点深受消费者喜爱。为了促进向更健康和可持续饮食结构的转变,以植物蛋白为原料的植物基肉制品成为了更多消费者的首要选择。针对植物基蛋白肉的蛋白来源、挤压工艺优化和产品配方已有大量文献报道,以植物基蛋白肉为原料经过后续加工处理制作的市售产品大多集中于素肉饼、素肉肠、素丸子、素牛排和素鸡块等现代快餐食品及休闲食品,尚未见以其为原料制作中式传统菜肴的相关报道^[8]。因此,以大豆蛋白素肉为原料开发传统菜肴宫保鸡丁的预制菜肴(The prepared dish Kung Pao Chicken with soy protein artificial meat, SPAM-KPC)既满足了消费者对于创新多样化风味的需求,又符合健康饮食、绿色可持续发展等观念的要求,同时为促进植物基蛋白肉在传统预制菜加工领域的应用提供了可行性研究。

贮藏温度、氧化酸败和微生物腐败是影响食品在贮藏过程中发生品质变化的重要因素,研究食品贮藏品质变化可为保障食品安全提供重要依据^[9-10]。因此,本研究比较了不同贮藏温度下 SPAM-KPC 贮藏品质的变化,并预测了不同贮藏温度下真空包装 SPAM-KPC 的货架期,为植物基蛋白肉在制作中式传统菜肴方面的应用提供了数据支持和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

高湿挤压大豆蛋白肉(大豆分离蛋白与谷朊粉的比例为 7:3,含水量为 60%) 基于实验室前期研究成果挤压制得;其他辅料、调料 均购自黑龙江哈尔滨市松北区大润发超市;平板计数琼脂培养基 北京奥博星生物技术有限公司;95% 乙醇 天津富宇精细化工有限公司;丙二醛乙缩醛 上海麦克林生化科技有限公司;其它化学试剂均为分析纯 购自黑龙江品臣科技有限公司。

TA.XT-Plus 物性测试仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司;CM-700d 色差仪 日本柯尼卡美能达公司;K9860 全自动凯氏定氮仪 济南海能仪器股份有限公司;PHSJ-3F 实验室 pH 计 上海仪电科学仪器股份有限公司;LDZX-50FB 立式压力蒸汽灭菌

锅 上海申安医疗器械厂;DK-98-II 电热恒温水浴锅 天津市东丽区天大化学试剂厂;LRH-150 生化培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;ZHJH-C 超净工作台 上海智城有限公司;UV-8000 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SPAM-KPC 制备工艺 SPAM-KPC 制备工艺参照传统糊辣味型宫保鸡丁的制作方法,并以感官评分为指标进行配方和工艺优化。

1.2.1.1 工艺流程 原料预处理→腌制→调制宫保汁→滑油→炒制→成品→真空包装→杀菌→贮藏。

1.2.1.2 操作要点 SPAM-KPC 的基础配方如表 1 所示。原料预处理:将素肉原料从冰箱取出,0~4 ℃条件下解冻至中心温度达到 0 ℃ 以上,沿纤维方向切成 1 cm³ 的小块;腌制:加入食盐、白胡椒粉、料酒、葱姜水和蛋清拌匀后,加入花椒油封油腌制 5 min;调制宫保汁:香醋、白糖、酱油、胡椒粉、水淀粉、葱段、姜片和蒜片调成宫保汁;滑油:在 90 ℃ 的油温下将素肉丁滑油 1 min 后捞出,使淀粉糊化定型;炒制:将花椒、干辣椒和素肉丁在 150 ℃ 的油温下煸炒 0.5 min 后,加入宫保汁和酥花生继续煸炒 1 min 后捞出置于白瓷盘中;真空包装:0~10 ℃ 冷却后使用透明耐高温蒸煮袋真空包装,并检查封口是否完整;杀菌:采用 100 ℃ 水浴杀菌 30 min。

表 1 SPAM-KPC 的基础配方 Table 1 Basic formula of SPAM-KPC					
主辅料	重量(g)	腌制液	重量(g)	宫保汁	重量(g)
素肉	180	食盐	2	白糖	8
酥花生	36	胡椒粉	3	香醋	8
干辣椒	9	葱姜水	10	酱油	5
花椒	9	蛋清	27	水淀粉	8
甜椒粉	18	料酒	6	姜	9
大葱	36	花椒油	6	蒜	9

经过杀菌处理的 SPAM-KPC 样品分别于 4、25、37 ℃ 温度条件下贮藏,每隔 3 d 取一次样,进行微生物、理化和感官指标的测定。

1.2.2 SPAM-KPC 品质表征方法

1.2.2.1 菌落总数的测定 参照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》^[11]的方法对样品的菌落总数(Total viable count, TVC)进行了测定,结果以 lg(CFU/g)表示。

1.2.2.2 pH 测定 参考 WANG 等^[12]的方法并稍加改动测量了 SPAM-KPC 样品的 pH。将不同杀菌处理的样品绞碎,取 10 g 绞碎后的样品分散于 100 mL 氯化钾(0.1 mol/L, pH7.0)中,于 8000 r/min 高速均质 30 s,用 pH 计测定均化后样品的 pH。

1.2.2.3 硫代巴比妥酸反应物(Thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)的测定 参照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的

测定》^[13]的方法对 SPAM-KPC 样品的 TBARS 值进行了测定,结果以每千克肉样中所含丙二醛的质量(mg)表示。

1.2.2.4 色泽测试 使用手持式色差仪测量了 SPAM-KPC 样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值。使用标准校准白瓷砖对色度计进行校正后,在每个试样的表面随机选取三个位置进行颜色测量。

1.2.2.5 质构测试 根据杨洪浪等^[14]的方法并略微修改,使用物性测定仪 TPA 程序测试了 SPAM-KPC 样品的质构特性。样品处理为 1 cm^3 的立方体,采用 P/5 柱形平底探头进行两次循环压缩试验,触发力 5 g、形变量 50%,下降速度、压缩速度和返回速度分别为 30、60 和 30 mm/min,重复测试 8 次,并记录样品硬度,弹性,咀嚼性和内聚力。

1.2.2.6 感官评价 由 10 名(5 男 5 女)食品专业的学生组成的小组对不同条件下贮藏的 SPAM-KPC 样品进行了感官评价^[15]。小组成员在进行感官评价之前均经过了严格的培训,熟悉感官评价方法和肉制品质量的评分标准。如表 2 所示,评分者被要求对菜肴样品的色泽、气味和口感进行打分,每个项目的评分标准为 1~9 分。对每个小组成员确定的平均分相加,计算了每个样本 3 个项目的总分。

表 2 SPAM-KPC 感官评分标准
Table 2 Sensory scoring standard of SPAM-KPC

项目	评分标准	分值
色泽	呈棕红色、富有光泽、颜色均匀一致	7~9
	呈浅棕红色、较有光泽、颜色较为均匀	4~6
	呈深棕红色、暗淡无光泽、颜色较深或较浅	1~3
气味	香气浓郁、无异味、糊辣味突出	7~9
	香气较浓郁、无异味、糊辣味适中	4~6
	香气较淡、略有酸味、糊辣味较淡或较重	1~3
口感	肉质软硬适中、咀嚼性良好、鲜嫩多汁	7~9
	肉质稍软或稍硬、咀嚼性和多汁性稍差	4~6
	肉质较软或较硬、咀嚼性和多汁性较差	1~3

1.2.3 SPAM-KPC 货架期预测模型的建立

1.2.3.1 微生物生长动力学模型 所测指标通过 Pearson 相关性分析结合指标的规定限量值得到影响 SPAM-KPC 货架期的关键品质因子为菌落总数,根据零级(1)和一级(2)动力学模型进行指数回归分析,并计算反应速率常数。

$$A = A_0 - kt \quad \text{式 (1)}$$

$$A = A_0 e^{kt} \quad \text{式 (2)}$$

其中, t 为贮藏时间, d; A 为贮藏 t (d) 的菌落总数对数值; A_0 为初始菌落总数对数值; k 为反应速率常数。

1.2.3.2 温度对微生物生长影响模型 应用 Arrhenius 方程^[16],式(3)预测了不同贮藏温度下 SPAM-KPC 产品的货架期。

$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln k_0 \quad \text{式 (3)}$$

其中, k 为反应速率常数; E_a 为反应体系的活化能, kJ/mol; T 表示贮藏的绝对温度, K; k_0 为指前因子; R 表示气体常数,为 $8.314\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

1.2.3.3 模型可靠性验证 计算了 SPAM-KPC 货架期的预测值和实际值之间的相对误差(Relative error, E_r),用以评价建立的微生物生长动力学模型的可靠性,相对误差按如下公式计算:

$$E_r(\%) = \frac{|N - N_0|}{N_0} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

其中: N_0 是实际实验所测得 SPAM-KPC 样品的货架期, d; N 是应用货架期预测模型计算所得预测值, d。

1.3 数据处理

除质构实验外,所有试验均在相同条件下进行三次,结果以平均值±标准偏差的形式表示。使用 SPSS 26.0 统计软件分析数据,通过单因素方差分析评估平均值之间的差异($P < 0.05$ 表示差异显著)。所有数据图均为 Origin 2021 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 SPAM-KPC 不同温度贮藏期间品质变化

2.1.1 贮藏温度对 SPAM-KPC 菌落总数的影响 菌落总数是表征食品微生物腐败变质程度的重要指标,经过水浴杀菌处理, SPAM-KPC 样品的起始平均菌落总数对数值相对较低($0.67\text{ lg}(\text{CFU/g})$)。如图 1 所示,随着贮藏时间的延长和贮藏温度的升高, SPAM-KPC 样品的菌落总数呈上升趋势,归因于 SPAM-KPC 中高浓度的营养物质和较高含水量为微生物的繁殖提供了有利环境^[17]。37 °C 下, SPAM-KPC 样品的菌落总数增长最快,贮藏 15 d 后达到 $4.33\text{ lg}(\text{CFU/g})$,接近 GB 2726-2016^[18] 规定的熟肉制品中检出菌落总数对数值的安全限值 $5\text{ lg}(\text{CFU/g})$;而在 4 °C 和 25 °C 下贮藏的样品在贮藏 15 d 后平均菌落总数对数值分别为 $2.73\text{ lg}(\text{CFU/g})$ 和 $3.37\text{ lg}(\text{CFU/g})$ 。

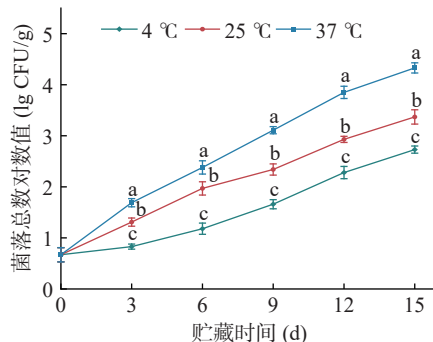


图 1 不同温度贮藏 SPAM-KPC 菌落总数的变化

Fig.1 Changes of total number of bacterial colonies of SPAM-KPC stored at different temperatures

注:不同小写英文字母表示相同贮藏时间不同温度数据差异显著($P < 0.05$);图 2~图 4 同。

(CFU/g), 远低于规定限量, 表明低温贮藏对微生物增殖有明显的抑制作用。袁诺等^[19]发现在同一杀菌条件下, 低温(4℃)贮藏比常温(25℃)贮藏下的卤蛋微生物起始增殖时间延长, 进一步说明低温贮藏是减缓食品微生物腐败的有效方法。

2.1.2 贮藏温度对 SPAM-KPC pH 的影响 食品贮藏过程中的 pH 变化受微生物繁殖和代谢活动等的影响^[20]。SPAM-KPC 的起始平均 pH 为 6.22 大于 4.6, 属于低酸性食品。不同温度下贮藏的 SPAM-KPC 样品 pH 变化如图 2 所示, 随着贮藏时间的延长整体呈缓慢下降趋势, 可能与 SPAM-KPC 样品中的糖和蛋白质被微生物分解导致酸和生物胺的积累有关^[12]。在 4℃ 下贮藏, 微生物繁殖缓慢, SPAM-KPC 样品的 pH 变化最小; 随着贮藏温度的升高, 微生物繁殖速度加快, SPAM-KPC 样品的 pH 下降幅度增大, 这与样品在贮藏期间菌落总数(图 1)分析结果一致。LUO 等^[21]研究了贮藏温度(4、25 和 35℃)对皮蛋感官品质、理化性质、风味和微生物指标的影响, 发现与高温贮藏和常温贮藏相比, 低温贮藏提高了皮蛋的感官评分、抑制了 pH 降低和挥发性盐基氮的增加($P<0.05$); 不同温度下贮藏的皮蛋氨基酸总含量差异显著($P<0.05$), 表明低温贮藏更有利于皮蛋的保存。

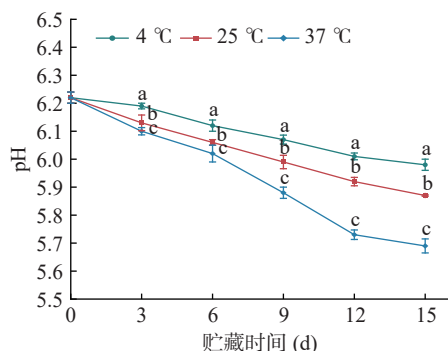


图 2 不同温度贮藏 SPAM-KPC pH 的变化
Fig.2 Changes of pH of SPAM-KPC stored at different temperatures

2.1.3 贮藏温度对 SPAM-KPC TBARS 值的影响 食品贮藏过程中发生脂质氧化, 会对产品色泽、风味、营养价值和整体质量产生不利影响, 此外脂质氧化的次级产物能够与蛋白质、肽类和氨基酸反应, 导致蛋白质氧化的加速^[22-23]。TBARS 值是评价食品在贮藏期间脂肪酸败程度的重要指标, 脂肪在贮藏过程中自动氧化生成氢过氧化物, 其进一步分解产生醛类物质^[22]。SPAM-KPC 样品中的脂肪主要是滑油和炒制过程中所用植物油。样品起始平均 TBARS 值为 0.35 mg/kg, 随着贮藏时间的延长和贮藏温度的升高, SPAM-KPC 样品的 TBARS 值呈缓慢上升趋势(图 3), 三个贮藏温度下的 TBARS 值均未达到异味阈值 2.0 mg/kg^[24], 表明贮藏期间脂肪氧化程度增加, 产品品质劣变。真空包装具有隔绝氧

气的作用, 一定程度上抑制了产品脂肪氧化, 因此贮藏前期的 TBARS 值增长缓慢。脂质氧化主要通过自由基链式反应发生, 烹饪热处理会使食品体系中的抗氧化酶失活促进脂质氧化; 冷冻或低温贮藏可以通过降低过氧化物酶的活性减缓脂质氧化^[25-26]。LIU 等^[27]发现随着贮藏温度(15、25 和 35℃)的升高和贮藏时间的延长, 花生粉中的丙二醛含量显著增加($P<0.05$), 证明高温贮藏会促进食品的脂质氧化, 从而加速产品品质劣变。

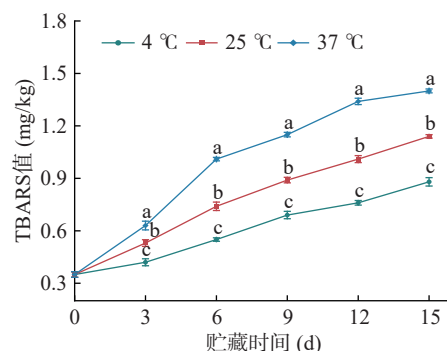


图 3 不同温度贮藏 SPAM-KPC TBARS 值的变化
Fig.3 Changes of TBARS value of SPAM-KPC stored at different temperatures

2.1.4 贮藏温度对 SPAM-KPC 色泽的影响 色泽是影响食品质量和消费者接受度的重要因素, 色差仪因其快捷、无损和量化差异值等优点被广泛应用于食品的颜色测量, L^* 、 a^* 和 b^* 值分别表示产品亮度、红绿值和黄蓝值^[28-29]。表 3 显示了不同贮藏温度下的 SPAM-KPC 样品色泽随贮藏时间延长的变化, SPAM-KPC 样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值在贮藏期间均呈缓慢降低趋势, 表明产品色泽逐渐变暗、加深, 这与王清波^[20]的研究结论相似。不同贮藏温度下色泽指标的变化差异显著($P<0.05$), 4℃ 下贮藏的 SPAM-KPC 在贮藏期间色泽变化幅度较小, 可能与低温贮藏微生物增殖和脂质氧化缓慢有关, 这与感官评价结果保持一致(图 4), 使用色差仪对食品的色泽进行表征可以显示出视觉无法分辨的颜色差异, 从而更好反映食品在贮藏期间的色泽变化。LI 等^[30]发现在贮藏过程中, 即食虾的外观逐渐变棕色和变黑, 色差仪测量结果显示, 贮藏后即食虾样品的白度降低、红度和黄度增加, 脂肪氧化、美拉德反应和虾青素降解等因素的综合作用导致了对虾的色泽劣变。

2.1.5 贮藏温度对 SPAM-KPC 质构的影响 硬度、弹性和咀嚼性等质构属性对食品的组织状态和质量有重要影响^[31]。不同贮藏温度下的 SPAM-KPC 样品质构特性随贮藏时间延长的变化如表 3 所示, SPAM-KPC 样品的硬度、弹性、咀嚼性和内聚性在贮藏期间整体下降, 且随着温度升高下降幅度逐渐增大, 不同贮藏温度下质构指标的变化差异显著($P<0.05$)。微生物活动和脂质氧化酸败等会破坏大豆蛋白肉纤维结构的完整性, 使产品黏性增加、硬度和内

表 3 不同温度贮藏 SPAM-KPC 色泽和质构特性的变化

Table 3 Changes of color and texture properties of SPAM-KPC stored at different temperatures

贮藏温度(℃)	贮藏时间(d)	L^*	a^*	b^*	硬度(N)	弹性(mm)	咀嚼性(mJ)	内聚性
4	0	73.02±0.94 ^a	9.25±0.10 ^a	28.59±0.18 ^a	1.92±0.02 ^a	11.01±0.16 ^a	8.80±0.17 ^a	0.86±0.03 ^a
	3	72.31±0.49 ^{ab}	9.09±0.24 ^{ab}	28.16±0.60 ^a	1.83±0.07 ^{ab}	10.59±0.27 ^a	8.70±0.38 ^a	0.80±0.09 ^{ab}
	6	71.90±0.62 ^{ab}	8.87±0.16 ^{bc}	27.51±0.17 ^b	1.78±0.09 ^b	10.44±0.12 ^a	8.46±0.06 ^a	0.74±0.04 ^{ab}
	9	71.25±0.70 ^{bc}	8.85±0.03 ^c	27.02±0.27 ^b	1.62±0.07 ^c	9.37±0.78 ^b	7.98±0.15 ^b	0.75±0.02 ^{ab}
	12	70.46±0.66 ^c	8.69±0.03 ^{cd}	26.41±0.07 ^c	1.32±0.06 ^d	8.66±0.47 ^{bc}	7.91±0.15 ^b	0.71±0.11 ^{bc}
	15	70.21±0.49 ^c	8.60±0.05 ^d	26.23±0.31 ^c	1.27±0.07 ^d	8.28±0.05 ^c	7.40±0.02 ^c	0.61±0.08 ^c
25	0	73.02±0.94 ^a	9.25±0.10 ^a	28.59±0.18 ^a	1.92±0.02 ^a	11.01±0.16 ^a	8.80±0.17 ^a	0.86±0.03 ^a
	3	71.88±0.48 ^b	8.94±0.31 ^b	27.73±0.31 ^b	1.75±0.04 ^{ab}	10.30±0.08 ^b	8.61±0.05 ^a	0.79±0.04 ^b
	6	71.12±0.33 ^b	8.71±0.23 ^b	26.45±0.23 ^c	1.46±0.10 ^{bc}	10.15±0.03 ^b	8.64±0.06 ^a	0.68±0.05 ^b
	9	69.58±0.21 ^c	8.50±0.22 ^c	25.66±0.22 ^d	1.44±0.27 ^{bc}	9.27±0.02 ^c	8.22±0.02 ^b	0.61±0.04 ^d
	12	68.24±0.83 ^c	8.32±0.17 ^d	24.28±0.17 ^e	1.07±0.32 ^{cd}	8.31±0.12 ^d	7.70±0.08 ^c	0.58±0.04 ^d
	15	67.34±0.75 ^d	8.01±0.36 ^e	23.47±0.36 ^e	1.17±0.11 ^d	8.13±0.08 ^e	7.36±0.16 ^d	0.55±0.02 ^d
37	0	73.02±0.88 ^a	9.25±0.10 ^a	28.59±0.18 ^a	1.92±0.02 ^a	11.01±0.16 ^a	8.80±0.17 ^a	0.86±0.03 ^a
	3	70.93±0.52 ^b	8.83±0.02 ^b	28.59±0.19 ^b	1.67±0.03 ^b	10.03±0.32 ^b	8.57±0.09 ^b	0.75±0.02 ^b
	6	70.25±0.42 ^b	8.50±0.02 ^c	26.78±0.14 ^c	1.67±0.11 ^b	9.91±0.17 ^b	8.22±0.13 ^c	0.7±0.04 ^b
	9	68.22±0.38 ^c	8.28±0.01 ^d	27.39±0.19 ^d	1.36±0.13 ^c	9.21±0.19 ^c	7.52±0.04 ^d	0.66±0.03 ^b
	12	67.15±0.13 ^d	7.95±0.12 ^e	24.93±0.21 ^e	1.07±0.04 ^d	8.5±0.41 ^d	7.19±0.1e	0.51±0.11 ^c
	15	65.32±0.33 ^e	7.69±0.06 ^f	22.73±0.42 ^f	0.84±0.11 ^e	7.89±0.16 ^e	6.96±0.02 ^f	0.46±0.01 ^c

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

聚性降低,咀嚼性和弹性随之降低。ZHANG 等^[32]研究了超声波辅助烹饪对五香牛肉冷藏品质特性的影响,发现产品硬度随着贮藏时间的延长而降低,可能归因于微生物通过分泌酶(弹性蛋白酶、枯草蛋白酶和中性蛋白酶)水解了胶原蛋白和肌原纤维蛋白,导致五香牛肉在冷藏过程中变嫩。

2.1.6 贮藏温度对 SPAM-KPC 感官得分的影响

感官评价是烹饪科学研究的重要方法之一,通过评价人员的各个感觉器官测量食品的颜色、味道、质地和香气等各种感官属性来确定产品的质量 and 可接受性^[5]。前期实验结果表明,SPAM-KPC 在外观和滋味方面与传统宫保鸡丁相比具有较高相似度,对鸡肉特有纤维结构的模拟略有不足,主要由于动植物蛋白结构特性的差异所致。总的来说,SPAM-KPC 既保留了传统宫保鸡丁红而不辣、鲜香味浓和肉质滑脆的良好感官属性,又具有创新多样化的独特风味。如图 4 所示,本研究采用了九分制感官评分法(满分 27 分),起始感官得分平均值为 25.12,随着贮藏时间的延长和贮藏温度的升高,SPAM-KPC 样品的感官得分整体下降,即其感官品质逐渐降低。规定当感官评分降低到 16.2(即总分的 60%)及以下时,产品达到保质期限值,不适宜食用。4℃ 下贮藏的 SPAM-KPC 样品,感官得分下降幅度最小,在贮藏 15 d 后,仍旧保留了较好的感官品质。贮藏温度为 25℃ 和 37℃ 时,感官得分下降幅度显著增加,分别为 19.52 和 16.84,但仍未超过保质期限值。微生物活动、脂肪氧化酸败和水分迁移等是导致食品感官品质劣变的关键因素^[10]。马良^[15]研究了不同杀菌条件下传统宫保鸡丁在贮藏期间的品质变化,发现贮藏期间熟制调理宫保鸡丁的外观、气味、滋味、质地和总体评分均呈下降趋势;不同杀菌条件下传统宫保鸡丁样品的

货架期均能达到 180 d 以上。与传统宫保鸡丁相比,SPAM-KPC 样品的货架期较短,可能由于杀菌方式的不同所致。此外,SPAM-KPC 蛋白含量较高,相比鸡肉更易腐败。

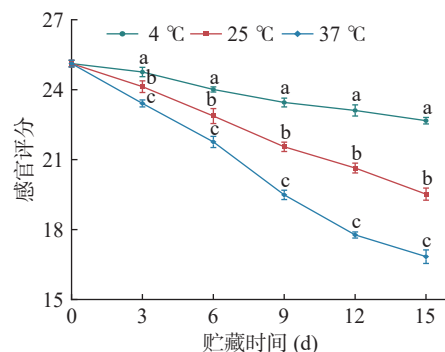


图 4 不同温度贮藏 SPAM-KPC 感官评分的变化

Fig.4 Changes of sensory score of SPAM-KPC stored at different temperatures

2.2 货架期预测模型分析

预制菜肴以其操作简单、食用方便的突出特点受到当下社会消费群体的广泛青睐。此外,高湿挤压大豆蛋白肉含水量高、营养丰富,极易导致微生物腐败。因此,为了实现以高湿挤压植物基蛋白肉为原料的传统菜肴工业化生产,在保证质量稳定的前提下延长其货架期,建立其货架期预测模型是非常必要的。贮藏过程中,大多数食品的品质变化规律都符合零级或一级动力学模型^[33]。利用零级和一级动力学模型结合 Arrhenius 方程研究了贮藏温度对 SPAM-KPC 在贮藏期间微生物生长的影响。

2.2.1 SPAM-KPC 贮藏期间品质指标相关性分析

Pearson 相关系数越大,说明两者之间的相关性越大,

即两个指标之间的关联度越高。不同贮藏温度贮藏期间 SPAM-KPC 的感官、理化和微生物指标之间的 Pearson 相关系数几乎全部大于 0.9; 菌落总数和 TBARS 值之间呈极显著正相关, 与其它指标呈极显著负相关 ($P<0.01$), 表明各指标间的相关性较好 (表 4)。因此, 所测指标可在一定程度上反应 SPAM-KPC 在贮藏期内品质变化情况。规定不同贮藏温度下, 当 SPAM-KPC 满足菌落总数 $\geq 5 \lg(\text{CFU/g})$ ^[18]、TBARS 值 $\geq 2 \text{ mg/kg}$ ^[24]和感官评分 ≤ 16.2 ^[24]这 3 种条件之一时, 即达到保质期限值, 认为不宜食用。根据实验结果, 只有 37 ℃ 贮藏 15 d 的 SPAM-KPC 样品菌落总数(4.33 lg(CFU/g))接近 5 lg(CFU/g), 25 ℃ 和 4 ℃ 贮藏过程中均远小于规定限值, 并且其他指标均未超出国家标准规定的范围。因此, 认为菌落总数是 SPAM-KPC 品质变化的关键因子, 并以其作为建立货架期预测模型的指标, 即菌落总数

$\geq 5 \lg(\text{CFU/g})$ 时, SPAM-KPC 达到货架期终点。

2.2.2 品质变化动力学分析 使用 IBM SPSS Statistics 26 软件对 SPAM-KPC 品质变化指标菌落总数进行回归分析, 得到不同贮藏温度下 SPAM-KPC 品质变化动力学模型参数。回归方程的决定系数 R^2 的大小体现食品品质变化指标对于动力学模型拟合精度的高低, ΣR^2 的大小可用于确定食品品质变化的级别^[8]。由表 5 可知, SPAM-KPC 在不同贮藏温度下的整体品质变化对于零级动力学方程拟合精度较一级动力学模型高, 因此 SPAM-KPC 在贮藏期间菌落总数的变化更符合零级动力学模型。

2.2.3 货架期预测和验证 结合零级反应动力学模型和 Arrhenius 方程, 得到 SPAM-KPC 的货架期 (shelf life, SL)/d 预测模型如下:

$$SL = \frac{|A_0 - A|}{k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}}}$$

式 (5)

表 4 SPAM-KPC 在不同贮藏温度下品质指标之间的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient among quality indexes of SPAM-KPC at different storage temperatures

温度(℃)	指标	菌落总数	pH	TBARS	感官得分	L^*	a^*	b^*	硬度	弹性	咀嚼性	内聚性
4	菌落总数	1.000										
	pH	-0.984**	1.000									
	TBARS	0.983**	-0.994**	1.000								
	感官得分	-0.971**	0.996**	-0.997**	1.000							
	L^*	-0.980**	0.991**	-0.985**	0.984**	1.000						
	a^*	-0.948**	0.981**	-0.973**	0.983**	0.976**	1.000					
	b^*	-0.974**	0.998**	-0.990*	0.994**	0.994**	0.985**	1.000				
	硬度	-0.989**	0.969**	-0.957**	0.946**	0.978**	0.929**	0.964**	1.000			
	弹性	-0.989**	0.978**	-0.979**	0.967**	0.985**	0.932**	0.974**	0.987**	1.000		
	咀嚼性	-0.980**	0.969**	-0.987**	0.974**	0.958**	0.931**	0.957**	0.944**	0.973**	1.000	
	内聚性	-0.932**	0.930**	-0.941**	0.935**	0.923**	0.953**	0.921**	0.895*	0.894*	0.936**	1.000
25	菌落总数	1.000										
	pH	-0.998**	1.000									
	TBARS	0.997**	-0.998**	1.000								
	感官得分	-0.995**	0.996**	-0.996**	1.000							
	L^*	-0.989**	0.993**	-0.986**	0.995**	1.000						
	a^*	-0.995**	0.995**	-0.993**	0.995**	0.988**	1.000					
	b^*	-0.996**	0.995**	-0.992**	0.996**	0.994**	0.991**	1.000				
	硬度	-0.967**	0.964**	-0.960**	0.949**	0.949**	0.938**	0.967**	1.000			
	弹性	-0.974**	0.982**	-0.968**	0.979**	0.994**	0.969**	0.982**	0.950**	1.000		
	咀嚼性	-0.934**	0.938**	-0.920**	0.948**	0.970**	0.941**	0.954**	0.882*	0.974**	1.000	
	内聚性	-0.982**	0.984**	-0.992**	0.980**	0.963**	0.972**	0.972**	0.958**	0.943**	0.870*	1.000
37	菌落总数	1.000										
	pH	-0.993**	1.000									
	TBARS	0.985**	-0.969**	1.000								
	感官得分	-0.996**	0.997**	-0.978**	1.000							
	L^*	-0.991**	0.987**	-0.956**	0.989**	1.000						
	a^*	-0.998**	0.989**	-0.984**	0.991**	0.990**	1.000					
	b^*	-0.946**	0.963**	-0.878*	0.953**	0.973**	0.945**	1.000				
	硬度	-0.970**	0.982**	-0.916*	0.974**	0.987**	0.968**	0.996**	1.000			
	弹性	-0.988**	0.987**	-0.947**	0.983**	0.996**	0.987**	0.981**	0.992**	1.000		
	咀嚼性	-0.982**	0.992**	-0.958**	0.995**	0.981**	0.975**	0.955**	0.973**	0.971**	1.000	
	内聚性	-0.983**	0.986**	-0.950**	0.978**	0.979**	0.986**	0.968**	0.982**	0.990**	0.961**	1.000

注: *显著相关($P<0.05$); **极显著相关($P<0.01$)。

表 5 PAM-KPC 在不同贮藏温度下品质变化动力学模型参数

Table 5 Parameters of kinetic model of PAM-KPC quality at different storage temperatures

指标	绝对温度(K)	零级动力学方程			一级动力学方程		
		k	R ²	ΣR ²	k	R ²	ΣR ²
菌落总数	277.15	0.144	0.971		0.096	0.987	
	298.15	0.178	0.993	2.954	0.115	0.809	2.506
	310.15	0.243	0.990		0.134	0.710	

对表 5 中 k 值的对数值(lnk)和贮藏温度的倒数(1/T)进行线性拟合,得到线性回归方程如下,R²为 0.941 说明拟合精度高,线性关系好。

$$\ln k = \frac{-1227.9}{T} + 2.552 \quad \text{式 (6)}$$

结合式(3)分别计算出菌落总数的反应动力学活化能 E_a(10.21 kJ/mol)和指前因子 k₀(12.83),将菌落总数初始均值 0.67 lg(CFU/g)、货架期阈值 5 lg(CFU/g)、E_a 和 k₀代入式(7),即得到以菌落总数为指标建立的 SPAM-KPC 货架期预测模型:

$$SL_{\text{菌落}} = \frac{4.33}{12.83e^{\frac{-10.21}{RT}}} \quad \text{式 (7)}$$

应用所建立的微生物动力学模型求得不同贮藏温度下 SPAM-KPC 样品货架期的预测值如表 6 所示。与实验实际值比较,4℃下贮藏的 SPAM-KPC 货架期预测值比实际值高 1 d,而在 25 和 37℃下贮藏的样品货架期预测值比实际值分别低 2 和 1 d,不同贮藏温度下 SPAM-KPC 货架期预测值和实际值的相对误差在 3.70%~9.09%之间,因此以菌落总数建立的 SPAM-KPC 货架期预测模型具有较高可靠性。葛鑫禹等^[34]以真空包装陕北炖羊肉为研究对象,研究了不同贮藏温度(4、25 和 37℃)下陕北炖羊肉贮藏品质(微生物、理化和感官指标)的变化,并应用一级动力学模型结合 Arrhenius 方程建立了基于 TBARS 值的陕北炖羊肉货架期预测模型,4、25 和 37℃下贮藏时,炖羊肉的预测货架期分别为 140、86 和 67 d。

表 6 PAM-KPC 在不同贮藏温度下货架期预测值和实测值
Table 6 Predicted and measured values of shelf life of PAM-KPC at different storage temperatures

温度(℃)	实测值(d)	预测值(d)	相对误差(%)
4	27	28	3.70
25	22	20	9.09
37	18	17	5.56

3 结论

随着贮藏时间的延长和贮藏温度的升高,SPAM-KPC 样品的菌落总数和 TBARS 值呈上升趋势;pH 和感官得分逐渐降低;SPAM-KPC 样品颜色逐渐加深,硬度和弹性降低。低温贮藏可以通过减缓微生物增殖速度和降低过氧化物酶的活性减缓脂质

氧化延长 SPAM-KPC 的货架期。相关性分析表明,影响 SPAM-KPC 货架期的关键因素为微生物数量。相比一级化学反应动力学模型,零级化学反应动力学模型能更好地拟合不同温度贮藏过程中 SPAM-KPC 菌落总数的变化,以菌落总数建立的 SPAM-KPC 货架期预测模型具有较高可靠性。本实验条件下,SPAM-KPC 在 4、25 和 37℃条件下的预测货架期分别为 28、20 和 17 d。研究结果可为植物基蛋白肉在预制菜加工领域的应用提供了理论参考。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 张德权,刘欢,孙祥祥,等.预制菜肴工业化加工技术现状与趋势分析[J].中国食品学报,2022,22(10):39-47. [ZHANG D Q, LIU H, SUN X X, et al. Analysis of current situation and trends of industrial processing technology for prepared dishes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 39-47.]
- [2] 李冬梅,张雪迪,毕景然,等.中式预制菜肴产业的传承与创新[J].中国食品学报,2022,22(10):1-8. [LI D M, ZHANG X D, BI J R, et al. Inheritance and innovation of Chinese prepared dishes industry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 1-8.]
- [3] ZHANG T Y, DOU W, ZHANG X, et al. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 702-710.
- [4] DAY L, CAKEBREAD J A, LOVEDAY S M. Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 428-442.
- [5] 孙莹,王龙,朱秀清,等.植物基蛋白肉的研究现状与挑战[J].食品工业科技,2023,44(17):438-446. [SUN Y, WANG L, ZHU X Q, et al. Research status and challenge on plant-based protein meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 438-446.]
- [6] LI Z, REGENSTEIN J M, ZHOU L Y, et al. Soy protein isolates: A review of their composition, aggregation, and gelation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 1940-1957.
- [7] WEBB D, LI Y, ALAVI S. Chemical and physicochemical features of common plant proteins and their extrudates for use in plant-based meat[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 131: 129-138.
- [8] 刘浩栋,张金闯,陈琼玲,等.植物基肉制品营养品质研究现状[J].中国食品学报,2023,23(8):428-439. [LIU H D, ZHANG J C, CHEN Q L, et al. Research status of nutritional quality of plant-based meat substitutes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(8): 428-439.]
- [9] WANG Z M, SHI Y, ZHOU K, et al. Effects of different thermal temperatures on the shelf life and microbial diversity of Dezhou-braised chicken[J]. Food Research International, 2020, 136: 109471.
- [10] 曹勇,张隋鑫,许秀颖,等.玉米薄饼贮藏品质分析及货架期

- 预测模型建立[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 235–242. [CAO Y, ZGANG S X, XU X Y, et al. Quality analysis of stored corn pancake and establishment of shelf-life prediction model[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 235–242.]
- [11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 4789.2-2022 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, 2022. [National Health Commission of the people's Republic of China. GB 4789.2-2022 National standard for food safety. Determination of the total number of microbiological bacteria in food[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2022.]
- [12] WANG Z F, HE Z F, ZHANG D, et al. Using oxidation kinetic models to predict the quality indices of rabbit meat under different storage temperatures[J]. *Meat Science*, 2020, 162: 108042.
- [13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 5009.181-2016 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3–5. [National Health Commission of the people's Republic of China. GB 5009.181-2016 National food safety standard. Determination of malondialdehyde in food[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016: 3–5.]
- [14] 杨洪浪, 华玲, 贾洪锋, 等. 宫保鸡丁烹制过程中品质的变化[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(4): 189–197. [YANG H L, HUA L, JIA H F, et al. Quality changes of kung pao chicken during cooking[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 189–197.]
- [15] 马良. 典型调理菜肴射频及其抑菌剂协同杀菌机理及品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [MA L. Study on the synergistic effects of radio frequency combined with antibacterial agents on the quality of typical prepared foods and related mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [16] RATKOWSKY D A, OLLEY J, MCMEKIN T A, et al. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. *Journal of Bacteriology*, 1982, 149(1): 1–5.
- [17] ODEYEMI O A, ALEGBELEYE O O, STRATEVA M, et al. Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 311–331.
- [18] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 2726-2016 食品安全国家标准 熟肉制品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health Commission of the people's Republic of China. GB 2726-2016 National standard for food safety. Cooked meat products[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016.]
- [19] 袁诺, 张清, 张小飞, 等. 不同杀菌温度及贮藏条件对卤蛋菌落总数和脂肪酸组分的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(13): 163–169. [YUAN N, ZHANG Q, ZHANG X F, et al. Effects of different sterilization temperatures and storage conditions on total bacterial count and fatty acid composition of marinated eggs[J]. *Food Science*, 2022, 43(13): 163–169.]
- [20] 王清波. 杀菌、冷藏及微波复热对红烧牛腩品质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [WANG Q B. Study on the effect of sterilization, cold storage and microwave reheating on the quality of stewed beef[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
- [21] LUO W X, XUE H, XIONG C H, et al. Effects of temperature on quality of preserved eggs during storage[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(6): 3144–3157.
- [22] 傅宝尚, 朱名, 王妍, 等. 鲍鱼预熟制及低温贮藏中的脂质氧化特性[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 232–236. [FU B S, ZHU M, WANG Y, et al. Oxidative lipid changes of abalone during pre-cooking and storage at low temperatures[J]. *Food Science*, 2017, 38(15): 232–236.]
- [23] 周洋, 谷大海, 王桂瑛, 等. 食盐对肉制品脂质氧化影响的研究进展[J]. *肉类研究*, 2017, 31(10): 46–52. [ZHOU Y, GU D H, WANG G Y, et al. Progress in research on the effect of salt on lipid oxidation in meat products[J]. *Meat Research*, 2017, 31(10): 46–52.]
- [24] 张建友, 赵瑜亮, 张梦雨, 等. 不同贮藏温度酱鸭品质变化及其货架期预测[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 250–257. [ZHANG J Y, ZHAO Y L, ZHANG M Y, et al. Quality changes and predictive modeling of shelf life of sauced duck stored at different temperatures[J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 250–257.]
- [25] MIN B, AHN D U. Mechanism of lipid peroxidation in meat and meat products-A review[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2005, 14(1): 152–163.
- [26] ST A A J, VERCELLOTTI J, JACKS T, et al. Lipid oxidation in foods[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 1996, 36(3): 175–224.
- [27] LIU K L, LIU Y, CHEN F S. Effect of storage temperature on lipid oxidation and changes in nutrient contents in peanuts[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(7): 2280–2290.
- [28] MARKOVIC I, ILIC J, MARKOVIC D, et al. Color measurement of food products using CIE $L^* a^* b^*$ and RGB color space[J]. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 2013, 4(1): 50–53.
- [29] 雷用东, 邓小蓉, 罗瑞峰, 等. 3 种颜色体系在食品应用中的研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(1): 241–246. [LEI Y D, DENG X R, LUO R F, et al. Progress in the application of three types of color system in color measurement of foods[J]. *Food Science*, 2016, 37(1): 241–246.]
- [30] LI D Y, YUAN Z, LIU Z Q, et al. Effect of oxidation and maillard reaction on color deterioration of ready-to-eat shrimps during storage[J]. *LWT*, 2020, 131: 109696.
- [31] KOHYAMA K. Food texture-sensory evaluation and instrumental measurement[J]. *Textural Characteristics of World Foods*, 2020: 1–13.
- [32] ZHANG J, ZHANG Y Q, ZOU Y H, et al. Effects of ultrasound-assisted cooking on quality characteristics of spiced beef during cold storage[J]. *LWT*, 2021, 136: 110359.
- [33] LABUZA T P, SHAPERO M, KAMMAN J. Prediction of nutrient losses[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1978, 2(2): 91–99.
- [34] 葛鑫禹, 刘永峰, 杨广东, 等. 陕北炖羊肉杀菌方式的比较及产品货架期预测[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(7): 214–225. [GE X Y, LIU Y F, YANG G D, et al. Comparison of sterilization methods of stewed mutton in northern shaanxi and prediction of shelf life[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(7): 214–225.]