

卡拉胶和谷氨酰胺转氨酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠品质特性的影响

侯建彪¹, 祝超智¹, 白雪原¹, 李璇¹, 郭旗¹, 赵改名^{1*}, 郝建刚²

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002)

(2. 乌拉盖综合试验站, 内蒙古锡林郭勒盟 026321)

摘要: 为研究熏煮杏鲍菇牛肉香肠的最佳工艺和配方, 该研究以熏煮杏鲍菇牛肉香肠为研究对象, 研究杏鲍菇、TG酶和卡拉胶的添加量以及斩拌时间对感官评分、质构、出品率、水分含量、持水性的影响, 再通过响应面试验优化分析出熏煮杏鲍菇牛肉香肠的最佳配方。单因素试验结果表明, 各因素对牛肉熏煮香肠的感官评分和出品率均有显著性影响 ($P<0.05$)。TG酶添加量为0.6%时香肠感官品质(63.46)、出品率(87.06%)、持水性(85.55%)最好 ($P<0.05$); 卡拉胶添加量为0.3%时, 熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评分最高(64.84), 此时香肠有较好的质构特性, 出品率为107.95%。经响应面试验得出, 当杏鲍菇、TG酶和卡拉胶的添加量分别为10.00%、0.65%、0.30%, 牛肉熏煮香肠的感官评分最佳(75.56), 且拥有较高的出品率(110.60%), 可用于工业生产。综上, TG酶和卡拉胶能够较好地改善熏煮杏鲍菇牛肉香肠的感官品质和出品率, 熏煮杏鲍菇牛肉香肠的最优配方为: 杏鲍菇添加量10.00%、TG酶添加量0.65%、卡拉胶添加量0.30%。该研究为熏煮牛肉香肠的研究提供理论依据。

关键词: 牛肉熏煮香肠; 杏鲍菇粒; 品质; 卡拉胶; 谷氨酰胺转氨酶

文章编号: 1673-9078(2024)12-238-251

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1280

Effect of Carrageenan and Glutamine Transaminase on the Quality Characteristics of Smoked Beef Sausage with *Pleurotus eryngii*

HOU Jianbiao¹, ZHU Chaozhi¹, BAI Xueyuan¹, LI Xuan¹, GUO Qi¹, ZHAO Gaiming^{1*}, HAO Jiangang²

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2. Wulagai Comprehensive Experimental Station, Xilinguolemeng 026321, China)

Abstract: In order to study the optimal process and formula of smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage, this study took the smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage as the research object, the effects of the addition amounts of *Pleurotus eryngii*, TG enzyme and carrageenan as well as the mixing time on the sensory evaluation score, texture, yield, moisture content and water-holding capacity were studied, and the optimal formula of smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage was obtained through optimization and analysis by the response surface test. The results of single factor tests showed that all the factors

引文格式:

侯建彪, 祝超智, 白雪原, 等. 卡拉胶和谷氨酰胺转氨酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 238-251.

HOU Jianbiao, ZHU Chaozhi, BAI Xueyuan, et al. Effect of carrageenan and glutamine transaminase on the quality characteristics of smoked beef sausage with *Pleurotus eryngii* [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 238-251.

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-37)

作者简介: 侯建彪 (1998-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 肉类加工与安全, E-mail: 924116850@qq.com

通讯作者: 赵改名 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉类加工与产品质量安全控制技术, E-mail: gmzhao@126.com

had significant ($P<0.05$) effects on the sensory score and yield of beef smoked and cooked sausage. The sensory quality (63.46), yield (87.06%) and water-holding capacity (85.55%) of the sausage were the best when the addition amount of TG enzyme was 0.6% ($P<0.05$). When the addition amount of carrageenan was 0.3%, the sensory score of smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage was the highest (64.84), and the sausage had good texture characteristics and the yield was 107.95%. The response surface test showed that when the addition amounts of *Pleurotus eryngii*, TG enzyme and carrageenan were 10.00%, 0.65% and 0.30%, respectively, the sensory score of beef smoked and boiled sausage was the best (75.56), and a high yield (110.60%) was obtained, indicating its suitability for industrial production. Taken together, TG enzyme and carrageenan can improve the sensory quality and yield of smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage. The optimal formula of smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage was: addition amount of *Pleurotus eryngii*, 10.00%; addition amount of TG enzyme, 0.65%; addition amount of carrageenan, 0.30%. This research provides a theoretical basis for the study of smoked and cooked beef sausage.

Key words: beef smoked sausage; *Pleurotus eryngii* granules; quality; carrageenan; glutamine transaminase

熏煮香肠是一种主要是以鲜、冻的禽畜肉为主要原料经（解冻）修整、绞制、搅拌、斩拌、灌装、蒸煮等处理后的肉类灌肠制品，它具有味道鲜美、保存方便、营养卫生的特点^[1]。目前，熏煮香肠的发展多样化，种类繁多，其中果蔬复合熏煮香肠就是典型的一类。然而，这类产品存在着质构松散、果蔬与肉糜的结合性差、保水保油性不佳等问题^[2,3]。大部分产品是以猪肉、鸡肉为原料，牛肉果蔬熏煮香肠研究较少。研究发现，牛肉的肌纤维直径和肌纤维碎片较猪肉和禽类的大，同时牛肉的肌纤维排列较紧密，这使得加工后牛肉的硬度和剪切力较大，影响了牛肉制品的嫩度^[4,5]；此外，人们在加工牛肉熏煮香肠时往往通过改善牛肌纤维蛋白乳化和凝胶特性来提升产品品质，因为牛肉肌纤维蛋白的乳化和凝胶特性与其他肉类存在差异^[5,6]。

杏鲍菇因其肉质鲜嫩，口感与鲍鱼口感相似而得名，富含营养和高蛋白质，有助于提高人体免疫力，在功能食品中具有潜在的应用价值^[7]。杏鲍菇与牛肉具有一定的营养互补性，杏鲍菇富含膳食纤维和微量元素，而牛肉则富含优质蛋白，氨基酸含量较高^[8]，因此，将它们结合可以生产出营养丰富的产品。然而，由于它们的质地、含水量和结构组织不同，导致杏鲍菇粒与肉糜没有很好地结合在一起，甚至会影响牛肉熏煮香肠的质地^[9]。因此，在加工过程中需要对杏鲍菇进行一定的预处理，通过添加 TG 酶、卡拉胶，以及改变斩拌时间等操作，来改善熏煮杏鲍菇牛肉香肠的质构^[10]，并解决它们相互结合较差的问题。

谷氨酰胺转氨酶（Glutamine Transaminase, TG 酶）可改善蛋白质的结构和功能，对蛋白质的热稳定性、乳化性、保水性和凝胶能力等改善有显著效

果，进而提升产品的感官品质、质构特性、出品率等^[11-13]。卡拉胶可以调节肉糜离子强度，具有优良的保水性和凝胶性，同时还有着可溶性膳食纤维的基本特性，可以显著改善肉糜类产品的蒸煮得率、质构特性等品质^[14-16]。

目前，果蔬熏煮香肠方向的研究有将藕渣不溶性膳食纤维和菊粉混合添加等复配添加加入熏煮香肠中^[17]，也有将高蛋白植物性食品或将果蔬以粉末的形式如胡萝卜粉添加加入熏煮香肠中的^[18-20]。然而，果蔬与牛肉糜之间的结合性仍存在问题，需要进一步深入研究。本研究主要旨在通过单因素分析 TG 酶添加量和卡拉胶添加量，以及斩拌时间等因素对熏煮杏鲍菇牛肉香肠的品质特性的影响，结合响应面优化试验，确定熏煮杏鲍菇牛肉香肠的最佳工艺配方，以为该类产品的开发提供参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

牛霖肉：同一批次，24 月龄的进口白俄罗斯牛霖肉，采样后真空包装， $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻储存待用。卡拉胶，青岛德惠海洋生物科技公司；大豆分离蛋白、玉米变性淀粉、谷氨酰胺转氨酶，均购于河南万邦实业有限公司；脂肪为猪背膘，购于双汇生鲜超市；杏鲍菇和食盐、味精等辅料均购于郑州丹尼斯花园路拜特超市。

1.2 仪器与设备

MM12B 型绞肉机，广东省韶关市大金食品机械厂；BC/BD-317HEF 型电冰箱，岛海尔电冰柜有限公司；AL104 型电子天平，上海梅特勒-托利多

仪器有限公司; BZBJ-80 斩拌机, 中国艾博公司; BPG-9156A 鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; CR-25000 真空灌肠机, 广东创锐有限公司; TA-XT Plus 型食品质构仪, 英国 Stable Microsystems 公司; Turbo-smart 水分含量仪, 美国 CEM 公司。

1.3 试验设计

1.3.1 熏煮杏鲍菇牛肉香肠配方

牛霖肉:猪背膘=8:2, 冰水 20 wt.%, 生姜粉 0.15 wt.%, 复合磷酸盐 0.3 wt.%, 食盐 2 wt.%, 小茴香粉 0.1 wt.%, 玉米变性淀粉 3 wt.%, 白砂糖 2 wt.%, 胡椒粉 0.4 wt.%。

1.3.2 果蔬牛肉熏煮香肠的制作工艺流程

该工艺流程参考 Oladipupo 等^[21]的方法并有所修改。

杏鲍菇处理:

原料处理→焯水→烘干→裹粉→过油→冷却备用(置于 4℃ 条件)

原料肉解冻(4℃, 24-48 h)→修整→绞肉(8 mm 孔板, 10℃)→腌制(4℃, 24 h)→斩拌(12℃以下, 9 min)→添加杏鲍菇粒(搅拌、混匀)→静置(4℃, 2 h)→灌肠→烘干(60℃, 30 min)→蒸煮→成品

1.3.3 单因素试验设计

熏煮杏鲍菇牛肉香肠基础配方中杏鲍菇添加 10 wt.%, TG 酶添加 0.2 wt.%, 卡拉胶添加 0.3 wt.%, 斩拌时间 9 min。本试验主要是通过改变杏鲍菇粒、TG 酶、卡拉胶的添加量以及斩拌时间, 研究其对熏煮杏鲍菇牛肉香肠的质构特性和感官等的影响。如表 1。

表 1 单因素试验设计

Table 1 Single factor test design

因素	水平				
杏鲍菇添加量/%	5	10	15	20	25
TG 酶添加量/%	0.2	0.4	0.6	0.8	1
卡拉胶添加量/%	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
斩拌时间/min	5	7	9	11	13

1.3.4 响应面优化试验与验证

在单因素试验的基础上, 结合分析结果选择杏鲍菇、TG 酶、卡拉胶添加量为考察因素, 以感官评分和出品率为响应值, 进行响应面试验。水平见表 2。

表 2 试验因素及水平

Table 2 Test factors and levels

水平	因素		
	杏鲍菇添加量/(wt.%)	TG 酶添加量/(wt.%)	卡拉胶添加量/(wt.%)
-1	5	0.4	0.2
0	10	0.6	0.3
1	15	0.8	0.4

1.4 测定指标

1.4.1 感官评定

邀请 15 名专业感官评定人员, 随机对样品进行感官评定, 每个样品评定前需漱口防止感官疲劳, 确保精确性, 按照表 3 进行感官评价, 总体接受程度表示的是感官评分的总分。

表 3 熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评定表

Table 3 Sensory evaluation form of smoked *Pleurotus eryngii* beef and cooked sausage

项目	标准	分值
色泽 (10 分)	颜色无光泽, 杏鲍菇粒不明显	0~3
	颜色光泽一般, 杏鲍菇粒较明显	4~7
	颜色有光泽, 杏鲍菇粒很明显	8~10
香气 (15 分)	香气淡, 杏鲍菇粒与牛肉香气不协调	0~5
	香气一般, 杏鲍菇粒与牛肉香气相适宜	6~10
	杏鲍菇与牛肉香气突出且相适宜	11~15
质地 (20 分)	整体质地偏硬或偏软, 杏鲍菇粒硬度与肉糜不相适宜	0~7
	整体质地一般, 杏鲍菇粒硬度与肉糜相适宜但难以区分	8~13
	整体质地较好, 杏鲍菇粒硬度与肉糜相适宜且有区分度	14~20
口感 (20 分)	口感粗糙难嚼, 杏鲍菇粒干硬, 有渣滓感	0~7
	口感较细腻, 杏鲍菇粒较柔韧, 略有渣滓感	8~13
	口感细腻耐嚼, 杏鲍菇粒柔韧, 无渣滓感	14~20
组织状态 (20 分)	切片表面不平整, 杏鲍菇粒与肉糜组织有裂痕	0~7
	切片表面较平整, 无明显裂纹, 杏鲍菇粒与肉糜组织较紧密	8~13
	切片表面完整, 无裂纹, 杏鲍菇粒与肉糜组织紧密	14~20

1.4.2 质构测定

参照赵改名等^[22]的方法进行测定, 采用 TA-XT

Plus 型食品质构仪, 将加热后的肉糜凝胶冷却至温度为 25 ℃, 用刀将肉样修整为直径 1.5 cm, 高 1.0 cm 圆柱形肉块进行测定。测定条件: P50 探头, 测试距离为 20 mm。

1.4.3 出品率测定

参照 Zou 等^[23]的测定方法并做修改。出品率指蒸煮之后的熏煮杏鲍菇牛肉香肠质量与原料肉质量的比值。

$$A = \frac{M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A ——出品率, %;

M_0 ——蒸煮前香肠的质量, g;

M_1 ——蒸煮后香肠的质量, g。

1.4.4 水分含量测定

为测定杏鲍菇熏煮香肠中肉糜的水分含量, 去除香肠中的杏鲍菇粒, 然后后搅碎成肉糜, 用 Turbo-smart 型水分含量测定仪进行测定, 每个样品平行测定 3 次。

1.4.5 持水性测定

参考张建梅等^[24]的方法并稍作修改, 将制备的香肠切成 5 mm 的薄片, 精确称量质量, 3 层滤纸将样品裹住后装入 50 mL 的离心管中, 采用低速台式大容量离心机在室温 20 ℃ 条件下, 以 10 000 r/min 离心 5 min, 待离心结束后, 立即取出样品并再次精确称量质量。每组试验平行检测 3 次。

$$B = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B ——出品率 (WHC), %;

m_1 ——离心管质量, g;

m_2 ——离心前样品和离心管质量, g;

m_3 ——离心后样品和离心管质量, g。

1.5 数据处理与统计分析

采用 SPSS 26 软件进行单因素方差分析以及显著性差异比较, 使用 Origin 2021 软件进行作图; 利用 Design Expert 10.0 软件的 Box-Behnken 法进行熏煮杏鲍菇牛肉香肠配方及工艺优化; 对验证试验结果中的感官评分进行独立样本 t 检验分析。

2 结果与讨论

2.1 杏鲍菇粒添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠品质影响单因素试验

2.1.1 杏鲍菇粒添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官、质构的影响

根据表 4 可知, 不同添加量的杏鲍菇粒对牛肉熏煮香肠的总体接受程度有显著性影响 ($P < 0.05$)。添加 10% 的杏鲍菇粒有着最好的质地 (15.80)、口感 (15.90)、组织状态 (16.00)、总体接受程度 (63.30)。当杏鲍菇粒添加量 $> 10\%$ 时, 香肠的质地、口感、组织状态呈现降低的趋势。主要是因为添加过量的杏鲍菇粒, 导致香肠的内部肉糜空间结构不稳定。杨勇胜等^[25]的研究结果显示, 香肠的感官评分随着杏鲍菇粒添加量的增加呈先上升后下降趋势, 与本研究结果相似。

根据表 5, 不同添加量的杏鲍菇粒对牛肉熏煮香肠的硬度、胶黏性、咀嚼性有显著性影响 ($P < 0.05$), 对弹性和恢复力没有显著性影响 ($P > 0.05$)。添加 10% 的杏鲍菇最为适宜, 此时香肠硬度 (5 751.12 g)、咀嚼性 (2 440.78) 较好。当添加量提升到 10% 后, 随着杏鲍菇粒添加量的增加, 香肠的硬度、胶黏性和咀嚼性呈现降低的趋势。主要是因为杏鲍菇粒添加过量, 使得杏鲍菇粒在香肠中分散不均匀且较为密集, 破坏了肌原纤维凝胶三维网络的连续性, 香肠的空间结构不稳定, 在外力作用下易散开, 熏煮香肠整体的质构变差^[26]。

表 4 杏鲍菇粒添加量对牛肉熏煮香肠感官评价的影响

Table 4 Effect of the addition of *Pleurotus eryngii* on the texture of beef smoked sausage

添加量/%	色泽	香气	质地	口感	组织状态	总体接受程度
5	6.16 ± 0.23 ^a	9.00 ± 0.35 ^a	14.00 ± 0.79 ^b	14.10 ± 0.65 ^c	14.10 ± 0.74 ^{bc}	57.30 ± 2.31 ^b
10	6.24 ± 0.25 ^a	9.40 ± 0.42 ^a	15.80 ± 0.84 ^a	15.90 ± 0.42 ^a	16.00 ± 0.50 ^a	63.30 ± 0.57 ^a
15	6.22 ± 0.30 ^a	9.70 ± 0.67 ^a	14.70 ± 0.67 ^b	15.00 ± 0.35 ^b	14.80 ± 0.84 ^b	60.50 ± 2.32 ^b
20	6.20 ± 0.21 ^a	9.70 ± 0.45 ^a	13.00 ± 0.61 ^c	13.60 ± 0.65 ^{cd}	13.60 ± 0.82 ^c	56.10 ± 2.41 ^{cd}
25	6.18 ± 0.22 ^a	9.70 ± 0.57 ^a	12.20 ± 0.84 ^c	13.10 ± 0.42 ^d	13.20 ± 0.84 ^c	54.40 ± 1.47 ^d

注: 平均值 ± 标准差, 同列均值有相同字母者表示差异不显著 ($P > 0.05$); 同列均值上标字母完全不同者表示差异显著 ($P < 0.05$)。表 5~11 同。

表 5 杏鲍菇粒添加量对牛肉熏煮香肠质构的影响

Table 5 Effect of the addition of *Pleurotus eryngii* on the texture of beef smoked sausage

添加量/%	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性	恢复力
5	5 527.97 ± 107.08 ^a	0.87 ± 0.02 ^a	2 686.87 ± 125.28 ^a	2 328.14 ± 67.84 ^a	0.21 ± 0.01 ^a
10	5 751.12 ± 448.59 ^a	0.84 ± 0.03 ^a	2 914.54 ± 524.09 ^a	2 440.78 ± 350.73 ^a	0.21 ± 0.03 ^a
15	4 366.73 ± 499.35 ^b	0.84 ± 0.04 ^a	1 858.87 ± 133.29 ^b	1 569.55 ± 152.66 ^b	0.18 ± 0.00 ^a
20	4 540.25 ± 546.20 ^b	0.88 ± 0.05 ^a	1 886.28 ± 215.31 ^b	1 671.57 ± 276.93 ^b	0.17 ± 0.04 ^a
25	3 918.47 ± 189.68 ^b	0.85 ± 0.07 ^a	1 851.73 ± 362.32 ^b	1 563.93 ± 177.56 ^b	0.20 ± 0.04 ^a

2.1.2 杏鲍菇粒添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

如图 1 所示, 杏鲍菇粒添加量对出品率有较显著的影响 ($P < 0.05$)。随着杏鲍菇粒添加量的逐渐增加, 杏鲍菇粒添加量对出品率呈先上升后下降的趋势, 当杏鲍菇添加量为 10 wt.% 时, 出品率达到最大, 为 109.18%。随着杏鲍菇粒添加量的逐渐增加, 熏煮香肠中杏鲍菇粒过量, 杏鲍菇粒在肉糜中分散较密集, 不利于肉糜体系的稳定, 导致香肠空间结构不稳定, 香肠质构变差, 蒸煮过程中水分损失, 出品率降低^[26]。

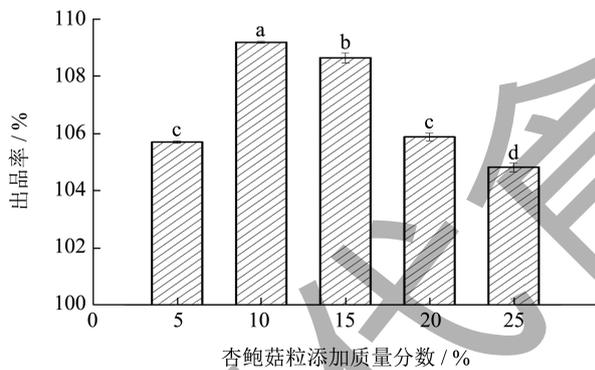


图 1 杏鲍菇粒添加量分数对牛肉熏煮香肠出品率的影响

Fig.1 Effect of the addition of *Pleurotus eryngii* on the yield of beef smoked and cooked sausage

注: 图中不同小写字母代表不同添加质量之间的差异显著水平 ($P < 0.05$), 下图同。

2.1.3 杏鲍菇粒添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠水分含量、持水性的影响

由图 2 可知, 杏鲍菇粒添加量对牛肉熏煮香肠水分含量的影响显著 ($P < 0.05$)。随着杏鲍菇粒添加量的逐渐增加, 水分含量整体呈下降的趋势。当杏鲍菇粒添加量为 5 wt.% 时, 熏煮香肠的水分含量 (62.12%) 显著较高 ($P < 0.05$), 当添加量为 20 wt.% 时, 熏煮香肠的水分含量显著较低 ($P < 0.05$), 这可能是杏鲍菇粒添加过量不利于肉糜

凝胶, 肌原纤维凝胶形成的网络结构不稳定, 在蒸煮过程中水分流失^[27]。

由图 3 可知, 杏鲍菇粒添加量对牛肉熏煮香肠持水性的影响显著 ($P < 0.05$)。随着杏鲍菇粒添加量的逐渐增加, 当添加量超过 10 wt.% 时, 香肠持水性呈下降的趋势, 这说明添加量在 10 wt.% 时牛肉熏煮香肠具有较好的持水性 (85.14%)。研究发现果蔬添加过量会破坏肉糜的凝胶结构稳定性, 持水性降低^[28]。肉制品的持水性能直接反映肉制品品质, 影响肉制品组织结构^[29], 表明在添加量为 10 wt.% 时牛肉熏煮香肠感官品质较好, 这与感官品质分析结果相对应。

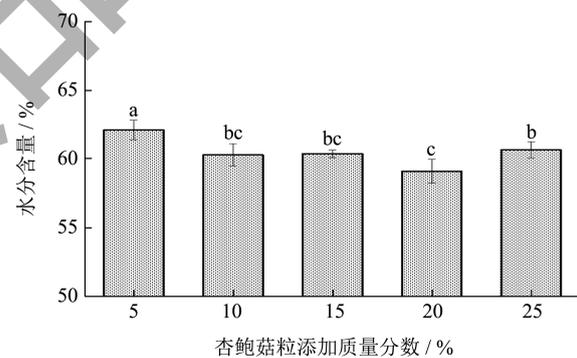


图 2 杏鲍菇粒添加量分数对牛肉熏煮香肠水分含量的影响

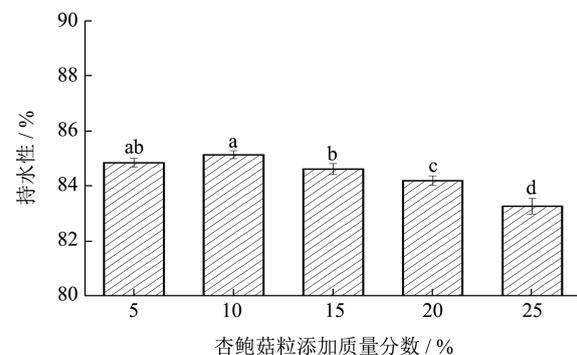
Fig.2 Effect of the addition of *Pleurotus eryngii* on moisture content of beef smoked and cooked sausage

图 3 杏鲍菇粒添加量对牛肉熏煮香肠持水性的影响

Fig.3 Effect of the addition of *Pleurotus eryngii* on water retention of beef smoked and cooked sausage

表 6 不同添加量TG酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评价的影响

Table 6 Effect of different addition levels of TG enzymes on sensory evaluation of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

添加量/%	色泽	香气	质地	口感	组织状态	总体接受程度
0.2	6.78 ± 0.23 ^a	9.86 ± 0.22 ^a	12.98 ± 0.60 ^c	13.96 ± 0.22 ^c	12.12 ± 0.44 ^c	55.70 ± 1.21 ^d
0.4	6.86 ± 0.37 ^a	10.34 ± 0.24 ^a	15.30 ± 0.45 ^a	14.66 ± 0.34 ^{ab}	14.84 ± 0.38 ^b	62.00 ± 0.66 ^b
0.6	6.96 ± 0.50 ^a	10.48 ± 0.58 ^a	15.70 ± 0.67 ^a	14.88 ± 0.38 ^a	15.44 ± 0.61 ^a	63.46 ± 1.45 ^a
0.8	6.90 ± 0.22 ^a	10.22 ± 0.54 ^a	14.50 ± 0.41 ^b	14.36 ± 0.43 ^{bc}	14.50 ± 0.41 ^b	60.48 ± 0.80 ^c
1.0	6.92 ± 0.30 ^a	10.14 ± 0.55 ^a	14.42 ± 0.43 ^b	14.18 ± 0.20 ^c	14.46 ± 0.38 ^b	60.12 ± 0.51 ^c

表 7 不同添加量TG酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠质构的影响

Table 7 Effect of glutamine transaminase addition on texture of beef sausage with *Pleurotus eryngii*

添加量/%	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性	恢复力
0.2	5 370.76 ± 53.12 ^c	0.86 ± 0.01 ^b	2 299.00 ± 140.80 ^c	2 023.80 ± 86.17 ^b	0.18 ± 0.01 ^c
0.4	7 611.57 ± 452.65 ^a	0.90 ± 0.02 ^{ab}	3 870.00 ± 463.29 ^a	3 498.07 ± 500.00 ^a	0.24 ± 0.01 ^{ab}
0.6	7 917.97 ± 315.36 ^a	0.91 ± 0.03 ^a	4 243.87 ± 267.41 ^a	3 864.92 ± 350.60 ^a	0.24 ± 0.02 ^{ab}
0.8	6 478.30 ± 286.85 ^b	0.92 ± 0.02 ^a	3 810.30 ± 365.91 ^a	3 258.40 ± 430.80 ^a	0.28 ± 0.05 ^a
1.0	6 125.07 ± 265.97 ^b	0.90 ± 0.02 ^{ab}	2 909.43 ± 158.05 ^b	2 611.70 ± 76.67 ^b	0.20 ± 0.00 ^{bc}

2.2 TG酶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠品质影响单因素试验

2.2.1 TG酶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官、质构的影响

TG酶能增强产品的保水性能^[30],同时,由于TG酶能够提高交联度,赋予肌原纤维蛋白良好的凝胶特性,从而提升牛肉熏煮香肠的品质。如表6所示,随着TG酶添加量的变化,香肠的质地、口感、组织状态存在显著性差异($P < 0.05$),在熏煮杏鲍菇牛肉香肠中,添加TG酶能加强肉糜蛋白间的共价键,强化凝胶网络结构,改善香肠结构^[31]。当TG酶添加量为0.6 wt.%时,香肠质地(15.70)、口感(14.88)、组织状态(15.44)评分较高,总体接受程度最高,为63.46。

从表7可以看出,TG酶的添加量对牛肉熏煮香肠的质构有显著性影响($P < 0.05$)。随着TG酶添加量的增加,香肠的硬度、胶黏性、咀嚼性和恢复力呈现先增加后降低的趋势。TG酶添加量为0.6%时,香肠的硬度(7 917.97 g)最大。Feng等^[31]研究发现,添加适量的TG酶可以有效改善香肠内部结构,提高凝胶交联度,改善肉质弹性,但添加过量会导致蛋白质过度聚集,导致凝胶结构减弱,从而降低其质地特性。

2.2.2 TG酶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

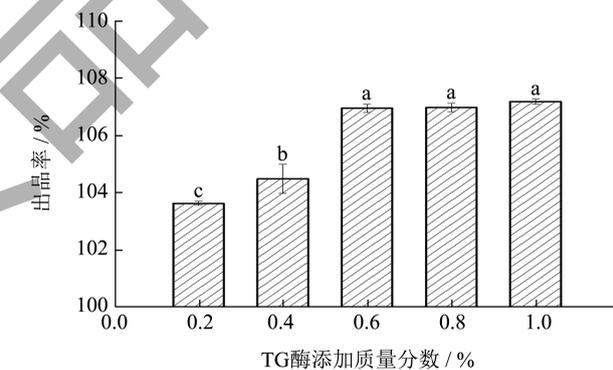


图 4 添加不同质量分数 TG 酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

Fig.4 Effect of different addition levels of TG enzymes on the yield of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

如图4所示,随着TG酶添加量的逐渐增加,出品率逐渐上升并趋于稳定。当TG酶添加量 $< 0.6%$ 时,牛肉熏煮香肠出品率显著提升。王昱等^[11]的研究表明,添加适量的TG酶可以提升肉糜凝胶的强度,形成稳定的网络结构,改善了凝胶保水性,这与本实验研究结果相似。当TG酶添加量 $\geq 0.6%$ 时,其出品率没有显著性差异,这可能是由于过量的TG酶诱导肉糜蛋白相互作用,过度交联,造成水

分流失,其中流失的水分可能被添加的卡拉胶吸收,从而出品率趋于稳定^[31]。

2.2.3 TG酶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠水分含量、持水性的影响

随着TG酶添加量的增加,牛肉熏煮香肠水分含量呈先上升后下降的趋势(图5)。当TG酶添加量为0.6%时,熏煮香肠的水分含量最高(62.80%)。当TG酶添加量>0.6%时,熏煮香肠的水分含量有缓慢下降的趋势,这可能是过多的TG酶诱导肉糜蛋白过度交联缩小了蛋白质之间的空间,这不利于维持乳化体系中的水分或脂肪含量^[32],从而导致水分的流失,水分含量降低。

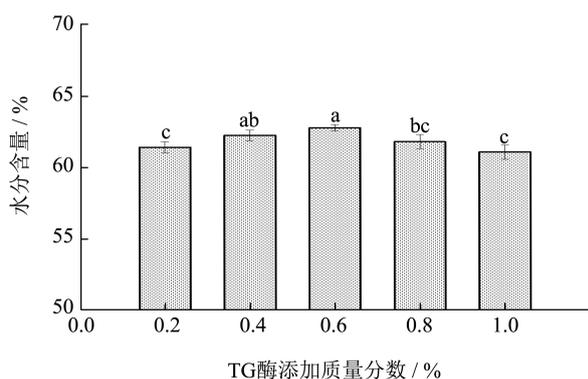


图5 添加不同质量分数TG酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠水分含量的影响

Fig.5 Effect of different addition levels of TG enzyme on moisture content of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

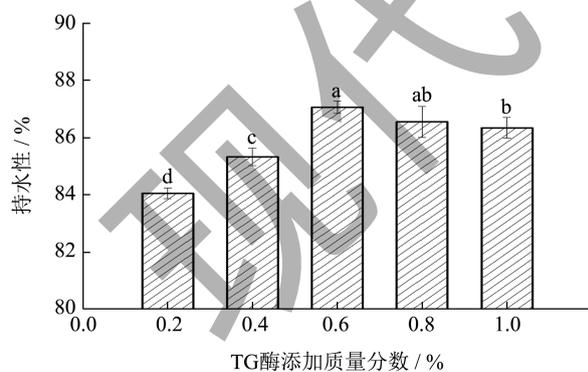


图6 添加不同质量分数TG酶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠持水性的影响

Fig.6 Effect of different addition levels of TG enzymes on water retention of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

由图6得知,随着TG酶添加量的增加,牛肉熏煮香肠持水性呈先上升后缓慢下降的趋势。当

TG酶添加量为0.6%时,熏煮香肠的持水性最好(87.06%)。有研究表明,添加TG酶能够诱导的肉糜蛋白间相互作用形成共价交联,能够形成良好的凝胶结构,限制了水分的流失,改善了保水性,然而,添加过量的TG酶会削弱水-肉糜蛋白的相互作用,从而降低蛋白质网络的持水能力^[33,34]。

2.3 卡拉胶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠品质影响单因素试验

2.3.1 卡拉胶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官、质构的影响

添加胶体能够改善肉糜类产品的食用品质,其中卡拉胶不仅自身能交联形成凝胶,还能与肉糜蛋白相互作用形成复合凝胶,提高肉糜的凝胶强度,从而提高产品的感官品质^[35]。根据表8可知,随着卡拉胶添加量的变化,牛肉熏煮香肠的质地、口感和组织状态呈现出先增加后降低的趋势。当添加0.3%的卡拉胶时,牛肉熏煮香肠的总体接受程度(64.84)最高($P < 0.05$)。Cao等^[36]研究发现,添加适量的卡拉胶会形成稳定的凝胶结构,可以提升香肠的质地和凝胶性能,这与本研究结果一致。

根据表9,可以看出随着卡拉胶添加量的增加,香肠的硬度呈现先增加后平缓降低的趋势,而胶粘性和咀嚼性先增加后趋于稳定。当卡拉胶添加量为0.3 wt.%时,香肠的硬度(6 564.82 g)最大($P < 0.05$)。当卡拉胶添加量<0.3 wt.%时,香肠的硬度、胶黏性、咀嚼性随添加量的增加而提升,而弹性方面无显著变化。有研究表明,添加适量的卡拉胶可以改善香肠的品质,提高肉糜的黏度,增强肉糜蛋白分子间的作用力,促进了与肉糜蛋白形成紧密的网络结构,并改善了香肠的结构特性^[37]。

2.3.2 卡拉胶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

如图7所示,随着卡拉胶添加量的逐渐增加,牛肉熏煮香肠出品率先增再趋于平稳,当卡拉胶添加量>0.3 wt.%时,出品率没有显著性差异;当卡拉胶添加量为0.3 wt.%时,出品率为107.95%。相关结果表明,卡拉胶能通过肉糜蛋白结合形成稳定的三维凝胶网络结构,提高保水保油性,同时卡拉胶自身也可以吸水,进而提高出品率^[38]。

表 8 不同添加量卡拉胶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评价的影响

Table 8 Effect of carrageenan addition on sensory of beef smoked sausage with *Pleurotus eryngii*

添加量/(wt.%)	色泽	香气	质地	口感	组织状态	总体接受程度
0.1	7.64 ± 0.59 ^a	10.22 ± 0.74 ^b	11.94 ± 0.44 ^d	11.16 ± 0.52 ^d	12.26 ± 0.53 ^c	53.22 ± 1.34 ^d
0.2	8.02 ± 0.32 ^a	10.44 ± 0.52 ^{ab}	12.78 ± 0.71 ^c	12.08 ± 0.47 ^c	13.82 ± 0.75 ^b	57.14 ± 1.87 ^c
0.3	8.16 ± 0.59 ^a	11.24 ± 0.66 ^a	15.06 ± 0.33 ^a	14.48 ± 0.46 ^a	15.90 ± 0.51 ^a	64.84 ± 1.82 ^a
0.4	7.80 ± 0.45 ^a	10.82 ± 0.69 ^{ab}	13.94 ± 0.49 ^b	13.72 ± 0.70 ^b	14.44 ± 0.38 ^b	60.72 ± 1.28 ^b
0.5	7.66 ± 0.42 ^a	10.34 ± 0.42 ^b	13.40 ± 0.31 ^{bc}	13.42 ± 0.43 ^b	14.10 ± 0.42 ^b	58.92 ± 1.50 ^{bc}

表 9 不同添加量卡拉胶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠质构的影响

Table 9 Effect of different dosage of carrageenan on texture of beef smoked sausage with *Pleurotus eryngii*

添加量/(wt.%)	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性	恢复力
0.1	4 719.30 ± 209.26 ^d	0.85 ± 0.02 ^a	2 234.67 ± 146.16 ^c	1 896.19 ± 127.40 ^c	0.18 ± 0.02 ^a
0.2	5 293.72 ± 476.10 ^{cd}	0.85 ± 0.03 ^a	2 536.39 ± 292.41 ^{bc}	2 155.38 ± 259.52 ^{bc}	0.19 ± 0.02 ^a
0.3	6 564.82 ± 512.96 ^a	0.86 ± 0.04 ^a	3 448.17 ± 521.06 ^a	2 941.89 ± 415.24 ^a	0.22 ± 0.03 ^a
0.4	6 492.13 ± 496.62 ^{ab}	0.87 ± 0.02 ^a	3 274.03 ± 628.61 ^a	2 834.38 ± 515.50 ^a	0.21 ± 0.04 ^a
0.5	5 868.52 ± 352.97 ^{bc}	0.87 ± 0.03 ^a	3 038.33 ± 225.45 ^{ab}	2 630.84 ± 236.60 ^{ab}	0.21 ± 0.03 ^a

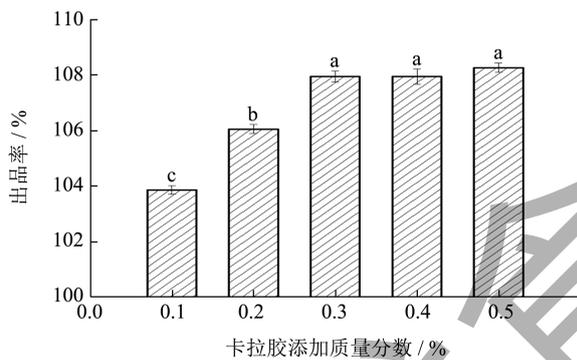


图 7 添加不同质量分数卡拉胶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

Fig.7 Effect of different dosage of carrageenan on yield of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

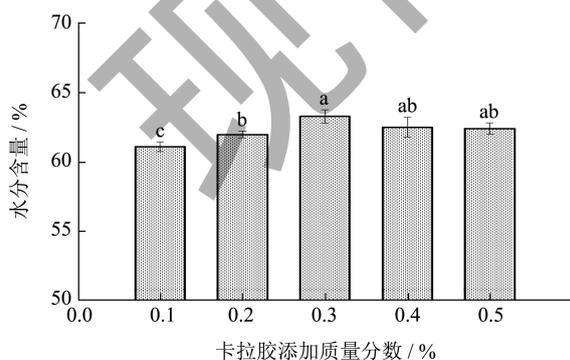


图 8 添加不同质量分数卡拉胶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠水分含量的影响

Fig.8 Effect of different dosage of carrageenan on moisture content of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

2.3.3 卡拉胶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠水分含量、持水性的影响

从图 8 可以看出,随着卡拉胶添加量的增加,熏煮杏鲍菇牛肉香肠的水分含量呈先增加然后稳定的趋势。当卡拉胶添加量 < 0.3 wt.% 时,卡拉胶添加量对熏煮杏鲍菇牛肉香肠的水分含量有着显著性的影响 ($P < 0.05$),这可能是因为添加适量卡拉胶增强了香肠的保水性。卡拉胶添加量为 0.3 wt.% 时水分含量最大,为 63.29%。

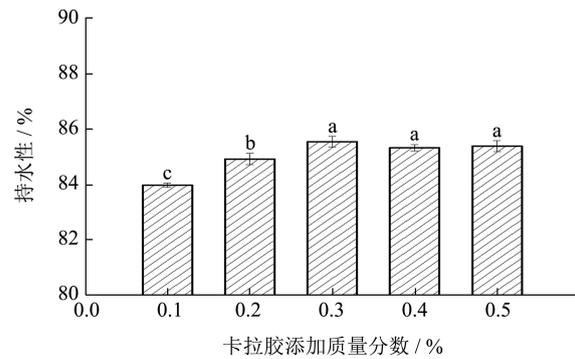


图 9 添加不同质量分数卡拉胶对熏煮杏鲍菇牛肉香肠持水性的影响

Fig.9 Effect of different dosage of carrageenan on water retention of beef smoked and boiled sausage with *Pleurotus eryngii*

从图 9 可以看出,随着卡拉胶添加量的增加,熏煮杏鲍菇牛肉香肠的持水性呈先增加后稳定的趋势,当添加 0.3 wt.% 的卡拉胶时,熏煮杏鲍菇牛肉

香肠的持水性 (85.55%) 最好 ($P < 0.05$)。研究发现, 添加适量的卡拉胶可以提高香肠的持水性, 将水分保留在形成的凝胶网络结构的间隙中^[31]。当卡拉胶添加量 $> 0.3 \text{ wt.}\%$ 时, 香肠持水性差异不显著, 这可能是因为卡拉胶仅吸引肉糜中游离的水分^[16]。

2.4 斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠品质影响单因素试验

2.4.1 斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官、质构的影响

随着斩拌时间的变化, 感官评分呈现先增加后降低的趋势, 且当斩拌时间在 9 min 时熏煮杏鲍菇牛肉香肠有着最好的感官品质 ($P < 0.05$), 此时总体接受程度为 66.76 (表 10)。当斩拌时间 $<$ 或 $>$ 9 min 时香肠感官品质显著较差 ($P < 0.05$)。这可能是斩拌时间较短, 肉糜未能形成完整的乳化体系, 从而影响香肠口感, 降低香肠感官品质。而当斩拌时间过长, 则会造成肉糜乳化过度, 进而破坏了乳化体系的稳定性, 出现“破乳”的现象, 导致香肠结构不紧实, 没有弹性。

从表 11 可以看出, 随着斩拌时间的增加, 香肠的硬度、咀嚼性和恢复力呈现先增加后降低的趋势。当斩拌时间为 9 min 时, 熏煮杏鲍菇牛肉香肠的硬度 (7 846.91 g)、咀嚼性 (3 753.55) 最好 ($P < 0.05$)。当斩拌时间超过 9 min 时, 熏煮杏鲍菇牛肉香肠的硬度、咀嚼性和恢复力逐渐变差。研究发现, 斩拌加快肉糜蛋白溶出与脂肪、水分形成

稳定的三维网络结构, 提高香肠的质构特性; 而长时间斩拌容易破坏肉糜蛋白-水-脂肪之间形成的乳化体系, 乳化能力降低, 蒸煮后产品质构变差, 出现出水出油现象^[39]。

2.4.2 斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

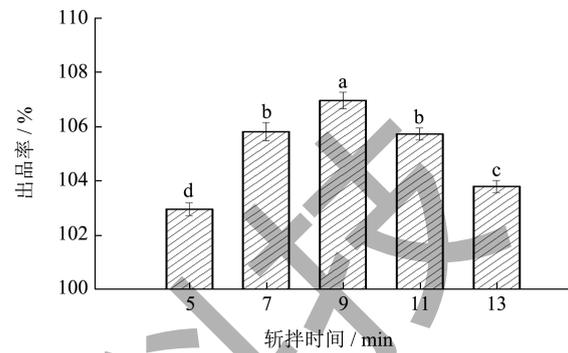


图 10 不同斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

Fig.10 Effect of different chopping time on the yield of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

如图 10 所示, 随着斩拌时间的增加, 出品率趋于先增加后降低的趋势, 在斩拌时间为 9 min 时, 出品率最高, 为 107.0%。由于斩拌可以加快肉糜蛋白溶出, 随着斩拌时间的增加, 肉糜蛋白溶出, 肉糜蛋白与脂肪、水分形成稳定的三维凝胶网络结构, 香肠的保水保油性提升, 出品率提高, 与夏陆阳等^[40]的研究结果相似。斩拌时间过长容易导致肉糜乳化体系破坏, 失去稳定的三维网络结构, 出现出水出油, 最终产品出品率降低。

表 10 不同斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评价的影响

Table 10 Effect of different chopping time on sensory evaluation of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

斩拌时间/min	色泽	香气	质地	口感	组织状态	总体接受程度
5	7.48 ± 0.52 ^a	10.20 ± 0.45 ^a	12.88 ± 0.40 ^d	13.10 ± 0.26 ^{cd}	12.98 ± 0.40 ^c	56.64 ± 1.81 ^d
7	7.60 ± 0.55 ^a	10.68 ± 0.41 ^a	15.50 ± 0.61 ^b	15.94 ± 0.34 ^b	14.30 ± 0.28 ^b	64.02 ± 1.24 ^b
9	7.68 ± 0.46 ^a	10.76 ± 0.25 ^a	16.28 ± 0.56 ^a	16.54 ± 0.67 ^a	15.50 ± 0.50 ^a	66.76 ± 0.80 ^a
11	7.36 ± 0.50 ^a	10.40 ± 0.55 ^a	14.34 ± 0.42 ^c	13.32 ± 0.41 ^c	13.54 ± 0.46 ^c	58.96 ± 1.23 ^c
13	7.36 ± 0.38 ^a	10.16 ± 0.48 ^a	13.12 ± 0.50 ^d	12.56 ± 0.44 ^d	13.20 ± 0.45 ^c	56.40 ± 1.33 ^d

表 11 不同斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠质构的影响

Table 11 Effect of different chopping time on texture of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

斩拌时间/min	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性	恢复力
5	6 498.37 ± 525.26 ^{bc}	0.82 ± 0.03 ^a	3 278.92 ± 641.39 ^a	2 675.34 ± 426.70 ^c	0.21 ± 0.03 ^{ab}
7	6 700.55 ± 829.85 ^{bc}	0.85 ± 0.03 ^a	3 493.99 ± 507.33 ^a	2 974.79 ± 339.38 ^{bc}	0.22 ± 0.02 ^{ab}
9	7 846.91 ± 412.35 ^a	0.88 ± 0.02 ^a	4 370.25 ± 692.63 ^a	3 753.55 ± 507.93 ^a	0.24 ± 0.03 ^a
11	7 421.24 ± 266.18 ^{ab}	0.85 ± 0.03 ^a	4 125.11 ± 183.38 ^a	3 490.07 ± 300.98 ^{ab}	0.25 ± 0.01 ^a
13	6 054.87 ± 85.76 ^c	0.81 ± 0.08 ^a	3 419.26 ± 796.74 ^a	2 586.87 ± 95.50 ^c	0.20 ± 0.01 ^b

2.4.3 斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠水分含量、持水性的影响

如图 11 所示,随着斩拌时间的增加,香肠的水分含量呈先增加后降低的趋势,在斩拌时间为 9 min 时,香肠的水分含量最高,为 65.24% ($P < 0.05$)。研究发现,斩拌时间对香肠品质有着重要的影响,盐溶性蛋白随着斩拌过程不断溶出,形成空间三维网络结构,水分不易流失。但斩拌时间过长,出现“破乳”的现象,造成部分水分流失。

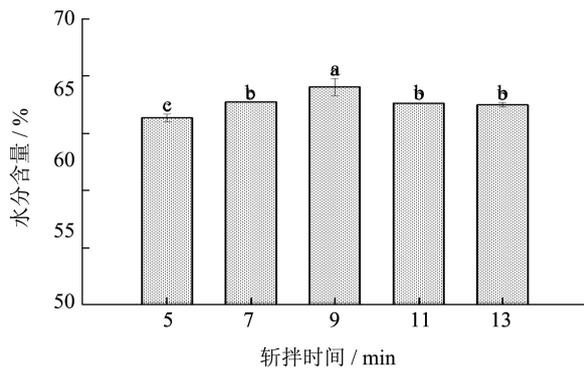


图 11 不同斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠持水性的影响

Fig.11 Effect of different chopping time on water retention of smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii* and beef

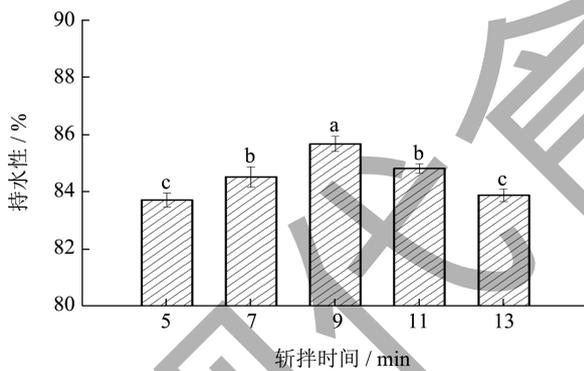


图 12 不同斩拌时间对熏煮杏鲍菇牛肉香肠持水性的影响

Fig.12 Effect of different chopping time on water retention of beef smoked and cooked sausage with *Pleurotus eryngii*

如图 12 所示,随着斩拌时间的延长,香肠的持水性呈先提升后降低的趋势,在斩拌时间为 9 min 时,香肠的持水性最高 (85.69%)。斩拌过程中,肉糜中溶出的盐溶性蛋白不断交联,逐渐形成稳定空间三维网络凝胶结构,将水分牢牢锁住。当斩拌时间超过 9 min 时,熏煮杏鲍菇牛肉香肠持水性显著降低 ($P > 0.05$),长时间斩拌容易引起局部肉糜温度升高,造成蛋白变性,影响乳化体系的稳定性,凝胶网络结构遭到破坏,持水性降低^[41]。

2.5 响应面优化试验结果与分析

2.5.1 Box-Behnken试验优化结果

采用 Design-Expert10.0 软件,以杏鲍菇、TG 酶、卡拉胶添加量为响应变量,以牛肉熏煮香肠感官评价得分和出品率作为响应值,得到的响应面试验设计方案及结果如表 12、表 13 所示。

表 12 试验方案编码和试验结果

Table 12 Test scheme coding and test results

试验号	A 杏鲍菇添加量/%	B TG 酶添加量/%	C 卡拉胶添加量/%	总体接受程度 Y_1 /分	出品率 Y_2 /%
1	10	0.6	0.3	77.15	110.98
2	10	0.6	0.3	77.41	111.56
3	15	0.6	0.2	62.07	107.01
4	5	0.4	0.3	57.39	108.94
5	10	0.4	0.2	60.20	107.52
6	10	0.6	0.3	79.18	111.2
7	15	0.4	0.3	57.81	108.3
8	10	0.6	0.3	77.67	111.16
9	5	0.6	0.4	67.06	110.71
10	10	0.8	0.4	71.90	110.25
11	15	0.8	0.3	60.46	108.88
12	10	0.4	0.4	67.06	110.55
13	5	0.8	0.3	65.30	110.69
14	10	0.6	0.3	78.30	111.31
15	10	0.8	0.2	70.70	109.74
16	5	0.6	0.2	60.51	106.68
17	15	0.6	0.4	60.86	108.42

由表 12 可知,通过响应面优化试验设计,将杏鲍菇、TG 酶、卡拉胶添加量三个因素的不同水平进行组合,得到 17 组试验搭配,其中响应值感官评分介于 79.18 到 57.39 之间,出品率在 111.56% 到 106.68% 之间。

表 13 可知,回归模型 P 值 < 0.01 ,表示该模型极显著;失拟方差 $P = 0.27 > 0.05$,不显著;杏鲍菇添加量对感官评价得分有显著性影响 ($P < 0.05$),TG 酶、卡拉胶添加量对感官评价得分影响极显著 ($P < 0.01$),且杏鲍菇粒添加量、TG 酶添加量、卡拉胶添加量之间存在相互作用 ($P < 0.05$),回归模型当中 A、B、C、 A^2 、 B^2 、 C^2 的 P 值均 < 0.05 ,说明模型拟合程度较好,各因素对感官评价得分的影响大小顺序为: TG 酶添加量 $>$ 卡拉胶添加量 $>$ 杏

鲍菇粒添加量。经逐步回归分析,取得最佳二次回归方程 ($P < 0.05$)。由 $R^2=0.99 > 0.85$, $R^2_{Adj}=0.99$, $R^2_{Pred}=0.94$, 回归方程拟合度和可信度均较高,因此,该模型能够很好的对感官评价的得分进行预测。

杏鲍菇、TG 酶、卡拉胶三者之间的感官评分回归模拟方程为:

$$Y_1=77.94-1.13*A+3.24*B+1.68*C-1.31*AB-1.94*AC-1.42*BC-11.27*A^2-6.43*B^2-4.04*C^2。$$

表 13 感官响应面方差分析

Table 13 Analysis of sensory response variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	996.89	9	110.77	120.63	<0.000 1	**
A (杏鲍菇添加量)	10.27	1	10.27	11.18	0.012 3	*
B (TG 酶添加量)	83.83	1	83.83	91.29	<0.000 1	**
C (卡拉胶添加量)	22.45	1	22.45	24.45	0.001 7	**
AB	6.90	1	6.90	7.51	0.028 9	*
AC	15.07	1	15.07	16.41	0.004 9	**
BC	8.03	1	8.03	8.75	0.021 2	*
A ²	534.95	1	534.95	582.60	<0.000 1	**
B ²	174.18	1	174.18	189.69	<0.000 1	**
C ²	68.85	1	68.85	74.98	<0.000 1	**
残差	6.43	7	0.92			
失拟方差	3.79	3	1.26	1.92	0.268 2	not significant
误差	2.64	4	0.66			
总和	1 003.32	16				

$R^2=0.99$; $R^2_{Adj}=0.99$; $R^2_{Pred}=0.94$; Adeq. Precision=28.74; C.V.%=1.42

注: ** 表示差异极显著, $P < 0.01$; * 表示差异显著, $P < 0.05$, 表 14 相同。

表 14 出品率响应面方差分析

Table 14 Analysis of yield response variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	40.31	9	4.48	45.76	<0.000 1	**
A (杏鲍菇添加量)	2.43	1	2.43	24.84	0.001 6	**
B (TG 酶添加量)	2.26	1	2.26	23.07	0.002 0	**
C (卡拉胶添加量)	10.08	1	10.08	102.98	<0.000 1	**
AB	0.34	1	0.34	3.50	0.103 7	
AC	1.72	1	1.72	17.53	0.004 1	**
BC	1.59	1	1.59	16.22	0.005 0	**
A ²	11.81	1	11.81	120.66	<0.000 1	**
B ²	0.56	1	0.56	5.72	0.048 0	**
C ²	7.81	1	7.81	79.83	<0.000 1	**
残差	0.69	7	0.10			
失拟方差	0.50	3	0.17	3.66	0.121 0	not significant
误差	0.18	4	0.05			
总和	41.00	16				

$R^2=0.98$; $R^2_{Adj}=0.96$; $R^2_{Pred}=0.80$; Adeq. Precision=16.80; C.V.%=0.29

由表 14 可知, 回归模型 P 值 < 0.01 , 表示该模型极显著; 失拟方差 $P=0.12 > 0.05$, 不显著; 杏鲍菇添加量、TG 酶、卡拉胶添加量对出品率影响极显著 ($P < 0.01$), 回归模型当中 A、B、C、AC、BC、 A^2 、 B^2 、 C^2 的 P 值均 < 0.05 , 说明模型拟合程度较好, 各因素对出品率的影响大小顺序为: 卡拉胶添加量 $>$ 杏鲍菇粒添加量 $>$ TG 酶添加量。经逐步回归分析, 取得最佳二次回归方程 ($P < 0.05$)。由 $R^2=0.98 > 0.85$, $R^2_{Adj}=0.96$, $R^2_{Pred}=0.80$, 回归方程拟合度和可信度均较高, 因此, 该模型能够很好的对出品率的得分进行预测。

杏鲍菇、TG 酶、卡拉胶三者之间的出品率回归模拟方程为:

$$Y_2 = 111.24 - 0.55 * A + 0.53 * B + 1.12 * C - 0.29 * AB - 0.66 * AC - 0.63 * BC - 1.67 * A^2 - 0.36 * B^2 - 1.36 * C^2$$

2.5.2 响应面优化分析

根据图 13、图 14 的分析, 可以发现各因素之间的相互作用呈现出凸面的三维图形, 而且最高点位于预定的区域内, 这表明所选择的因素是合适的。

由图 13 分析得出, 杏鲍菇粒添加量、TG 酶添加量和卡拉胶添加量之间交互作用对熏煮杏鲍菇牛肉香肠的感官评分产生了显著影响。AB 和 BC 交互作用 3D 响应面曲面弯折程度大, 坡度较峭, 且等

高线趋向于椭圆形, 表明熏煮杏鲍菇牛肉香肠的感官评分与其交互作用相关性较显著 ($P < 0.05$); 与 AB 和 BC 交互作用相比, AC 的交互作用响应面曲线斜率最陡, 且等高线近似椭圆形, 说明 AC 交互作用对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评分的影响更为显著 ($P < 0.01$), 具体表现为感官评分随某一因素的增大呈先上升后下降的趋势; 这与方差显著性分析的结果一致。随着取值范围内杏鲍菇粒添加量的增加, 熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评分呈先上升后下降的趋势, 卡拉胶添加量的临界值也呈现上升趋势, 这可能是由于一定的杏鲍菇粒添加量和卡拉胶添加量范围内, 有利于形成稳定的凝胶组织结构, 提升香肠的感官品质。

由图 14 分析得出, 杏鲍菇粒添加量、TG 酶添加量和卡拉胶添加量之间交互作用对熏煮杏鲍菇牛肉香肠的出品率产生了影响。AC 和 BC 交互作用 3D 响应面曲面弯折程度大, 坡度较峭, 且等高线近似于椭圆形, 表明其交互作用对于熏煮杏鲍菇牛肉香肠的出品率极显著 ($P < 0.01$); 这与方差显著性分析的结果一致。固定卡拉胶添加量, 随着取值范围内杏鲍菇粒添加量的增加, 熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率呈先上升后下降的趋势。在杏鲍菇粒添加量为 10%、TG 酶添加量 0.6% 和卡拉胶添加量 0.3% 时, 出品率最高。

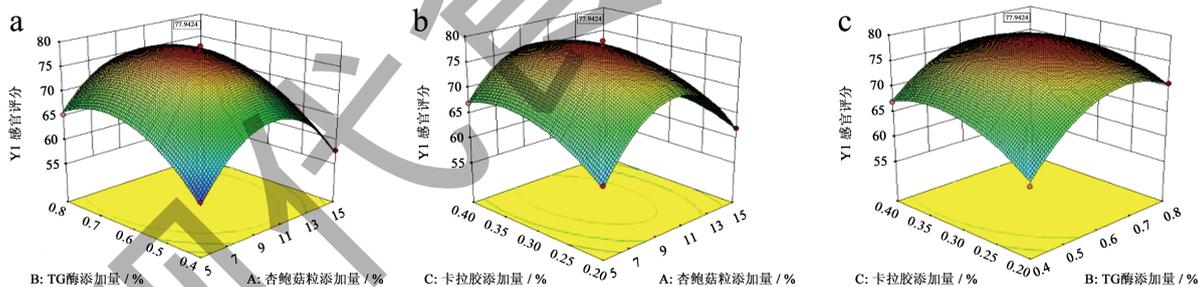


图 13 杏鲍菇粒、TG 酶和卡拉胶之间交互作用对熏煮杏鲍菇牛肉香肠感官评分的影响

Fig.13 Effects of interaction between with *Pleurotus eryngii*, TG enzyme and carrageenan on sensory scores of with smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage

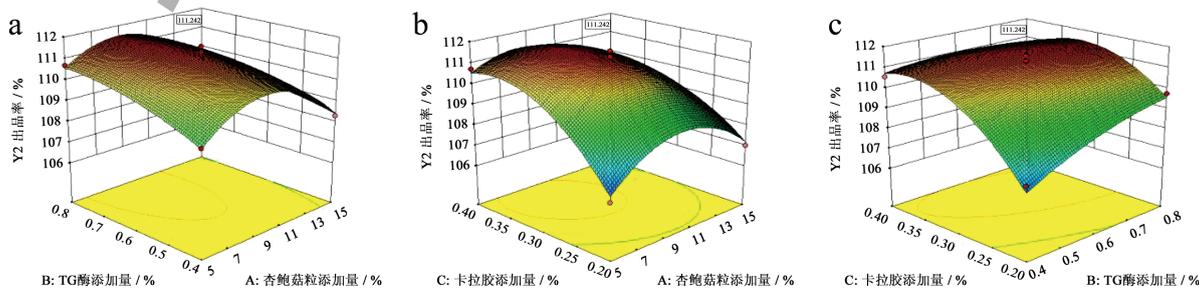


图 14 杏鲍菇粒、TG 酶和卡拉胶之间交互作用对熏煮杏鲍菇牛肉香肠出品率的影响

Fig.14 Influence of interaction among *Pleurotus eryngii* granules, TG enzyme and carrageenan on yield of smoked *Pleurotus eryngii* beef sausage

2.6 优化验证试验

运用 Design-Expert 10.0 软件对回归方程进行计算, 将杏鲍菇粒添加量、TG 酶添加量和卡拉胶添加量的取值范围分别设定为 5%~15%、0.4%~0.8%、0.2%~0.4%, 将目标值设为最大值, 得到的最优组合见表 15。

表 15 验证试验结果

参数	组合 1	组合 2
杏鲍菇添加量/%	9.70	9.10
TG 酶添加量/%	0.65	0.75
卡拉胶添加量/%	0.32	0.33
感官预测值	78.52	76.73
感官试验值	75.56	69.26
出品率预测值/%	111.53	111.63
出品率试验值/%	110.60	110.85

根据实际情况将最优组合中各占比调整为(以质量分数计): 组合 1、杏鲍菇粒添加量 10.00%, TG 酶添加量 0.65%, 卡拉胶添加量 0.30%; 组合 2、杏鲍菇粒添加量 9.00%, TG 酶添加量 0.75%, 卡拉胶添加量 0.30%。在调整后的各比例下做出的熏煮杏鲍菇牛肉香肠的感官试验值和出品率试验值见表 15, 其中组合 1 和组合 2 的感官试验值经 t 检验分析存在显著性差异 ($P < 0.05$), 见表 16, 而且组合 1 的感官试验值较高。因此, 组合 1 对应的模型较精确, 该模型符合实际生产要求, 可用于熏煮杏鲍菇牛肉香肠的生产加工。

表 16 组合 1 和组合 2 感官试验值差异分析

Table 16 Difference analysis of sensory test values between combination 1 and combination 2

方差类型	levene 方差 等同性检验		平均值等同性 t 检验					
	F	显著性	t	自由度	显著性	平均值差	标准误差差值	
感官试验值	假定等方差	0.02	0.90	6.42	4	0.003	6.30	0.98
	不假定等方差			6.42	3.96	0.003	6.30	0.98

3 结论

本研究为改善熏煮杏鲍菇牛肉香肠的品质, 以杏鲍菇、牛肉为主要原料结合传统熏煮香肠的生产

工艺, 在单因素实验的基础上用响应面法对熏煮杏鲍菇牛肉香肠的主要成分添加量进行优化试验。结果表明: 添加 0.6 wt.% 的 TG 酶和 0.3 wt.% 的卡拉胶, 通过合适斩拌时间能够较好地改善杏鲍菇粒与牛肉肉糜之间的结合状态, 提升熏煮杏鲍菇牛肉香肠的感官品质, 同时得到制作熏煮杏鲍菇牛肉香肠的最佳工艺条件: 杏鲍菇粒添加量 10.00 wt.%, TG 酶添加量 0.65 wt.%, 卡拉胶添加量 0.30 wt.%, 此时熏煮杏鲍菇牛肉香肠的感官评分为 75.56, 出品率为 110.60%, 具有较好的感官品质和出品率。

参考文献

- [1] 王昭钰, 王向坡, 张万刚. 丙酸杆菌发酵提取物-乳酸链球菌素复配对熏煮香肠品质的影响[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 239-249.
- [2] 施帅, 李志方, 陈桃桃. 复合保水剂对乳化肠保水性保油性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(17): 96-101.
- [3] 王正荣, 阮夏青, 马文涛, 等. 苹果渣结合预乳化稻米油对低脂猪肉丸品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 54-59.
- [4] 王亮, 张宝善, 李林强, 等. 猪牛羊肌肉组织质构特性差异比较及肌纤维分析[J]. 中国牛业科学, 2016, 42(3): 34-38.
- [5] 赵改名, 李珊珊, 崔文明, 等. 夏南牛不同部位加工特性及牛肉干加工适宜性评价(英文)[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 80-89.
- [6] 于晶超, 赵冰, 王守伟, 等. 可得然胶对肌原纤维蛋白理化和凝胶性质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 27-38.
- [7] YUAN B, ZHAO L, RAKARIYATHAM K, et al. Isolation of a novel bioactive protein from an edible mushroom *Pleurotus eryngii* and its anti-inflammatory potential [J]. Food Funct, 2017, 8, 2175-2183.
- [8] 白雪原. 屠宰年龄对牦牛肉品质特性的影响机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
- [9] M FLORES, E GINER, S M FISZMAN, et al. Effect of a new emulsifier containing sodium stearoyl-2-lactylate and carrageenan on the functionality of meat emulsion systems [J]. Meat Science, 2007, 76(1): 9-18.
- [10] LAN H J, CHEN L, WANG Y T, et al. Effect of κ -carrageenan on saltiness perception and texture characteristic related to salt release in low-salt surimi [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(P7): 126852-126852.
- [11] 王昱, 王家乐, 袁晶晶, 等. L-赖氨酸与谷氨酰胺转氨酶联合处理对低盐鸡肉糜凝胶保水及质构品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 24-30.
- [12] FANG M, XIONG S, YIN T, et al. *In vivo* digestion and absorption characteristics of surimi gels with different degrees of cross-linking induced by transglutaminase (TGase) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107007.
- [13] 张靖铭, 冯扬扬, 时平茹, 等. 谷氨酰胺转氨酶催化交联

- 对肌原纤维蛋白凝胶特性影响的研究进展[J].食品科学,2024,45(5):293-302.
- [14] CAO C, FENG Y, KONG B, et al. Textural and gel properties of frankfurters as influenced by various kappa-carrageenan incorporation methods [J]. Meat Sci, 2021, 176: 108483.
- [15] XU J H, FAN Y H, CHEN Q, et al. Effects of κ -carrageenan gum on 3D printability and rheological properties of pork pastes [J]. Meat Science, 2023, 197: 109078.
- [16] 茹昂.亲水胶体对乳化牛肉糜流变性和凝胶性作用规律研究[D].郑州:河南农业大学,2022.
- [17] 杨波若,陈韬,吴强.藕渣不溶性膳食纤维和菊粉混合添加对广式香肠品质的影响[J].食品研究与开发,2022,43(4): 98-107.
- [18] 王春幸.果蔬肉复合火腿工艺优化及品质特性研究[D].重庆:西南大学,2022.
- [19] KASAIYAN S A, CARO I, RAMOS D D, et al. Effects of the use of raw or cooked chickpeas and the sausage cooking time on the quality of a lamb-meat, olive-oil emulsion-type sausage [J]. Meat Science, 2023, 202: 109217.
- [20] 闫瑞,唐敏,陈东方,等.白萝卜粉作为亚硝酸盐来源制备猪肉发酵干香肠[J].食品科学,2023,44(8):101-108.
- [21] OLADIPUPO Q A, MICHAEL E N, LOUWRENS C H, et al. Effects of incorporating processed Acacia seed as an emulsifying agent on the quality attributes of beef sausage [J]. Meat Science, 2023, 197: 109069.
- [22] 赵改名,候建彪,祝超智,等.南阳黄牛不同部位肉品质特性差异分析[J].肉类研究,2022,36(9):1-6.
- [23] ZOU Y, SHI H B, XU P P, et al. Combined effect of ultrasound and sodium bicarbonate marination on chicken breast tenderness and its molecular mechanism [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2019, 54(12): 104735.
- [24] 张建梅,厉建军,徐世明,等.低脂熏煮香肠的配方优化研究[J].农产品加工,2019,17:46-50,55.
- [25] 杨勇胜,姚宏亮,李静.杏鲍菇香肠配方及工艺优化研究[J].肉类工业,2021,11:15-20.
- [26] 班红玲,谢文佩,陈婕兰,等.添加圆苞车前子壳粉的猪肉香肠配方优化及品质特性研究[J].食品科技,2023,48(8):105-112.
- [27] 胡亚芹,葛雨珺,白妍,等.热处理对肉类蛋白质构的影响[J].渔业科学进展,2019,40(5):175-184.
- [28] 李继红.山黑猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性及其复合熏煮香肠的开发研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [29] 朱立蕊.复合蔬菜粒熏煮香肠的配方优化及工艺研究[D].长春:吉林农业大学,2016.
- [30] CANDO D, BORDERIAS A, MORENO H. Combined effect of aminoacids and microbial transglutaminase on gelation of low salt surimi content under high pressure processing [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 36: 10-17.
- [31] FANG Y Y, LIANG X, ZHANG J M, et al. Underlying mechanisms and combined effects of transglutaminase and κ -carrageenan on the quality profiles and *in vitro* digestibility of frankfurters [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109344.
- [32] KIM T, HWANG K, HAM Y, et al. Interactions between raw meat irradiated by various kinds of ionizing radiation and transglutaminase treatment in meat emulsion systems [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 166: 108452.
- [33] LV Y Q, FENG X C, YANG R, et al. Dual role (promotion and inhibition) of transglutaminase in mediating myofibrillar protein gelation under malondialdehyde-induced oxidative stress [J]. Food Chemistry, 2021, 353(15): 129453.
- [34] DONG X P, PAN Y X, ZHAO W Y, et al. Impact of microbial transglutaminase on 3D printing quality of *Scomberomorus niphonius* surimi [J]. LWT, 2020, 124: 109123.
- [35] 孟子晴,赵改名,祝超智,等. κ -卡拉胶对西门塔尔杂交牛肉糜品质影响评价模型的建立[J].食品与发酵工业,2020, 46(1):136-142.
- [36] CAO C A, FENG Y Y, KONG B H, et al. Textural and gel properties of frankfurters as influenced by various κ -carrageenan incorporation methods [J]. Meat Science, 2021, 176: 108483.
- [37] CAO C A, YUAN D X, KONG B H, et al. Effect of different κ -carrageenan incorporation forms on the gel properties and *in vitro* digestibility of frankfurters [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107637.
- [38] 付丽,庄军辉,高雪琴,等. κ -卡拉胶与亚麻籽胶复配对成型火腿品质的影响[J].肉类研究,2021,35(12):13-19.
- [39] 邓秀蝶,杨媚,廖嫦雯,等.斩拌对鱼糜凝胶特性影响的研究进展[J].食品安全导刊,2022,29:147-149.
- [40] 夏陆阳,刘肇龙,熊国远,等.加工方式对圩猪和程岭黑猪肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(21):126-133.
- [41] 朱士臣,任晓露,魏传双,等.斩拌处理对鱼糜肌原纤维蛋白结构特性的影响及效应分析[J].核农学报,2023, 37(11):2206-2213.