

不同酿酒酵母发酵大豆蛋白素肉肠品质分析

王佳仪^{1,2}, 王正荣², 潘晓倩^{1*}, 赵畅雯², 林冬梅²

(1.中国肉类食品综合研究中心,北京 100068;2.河北工程大学 生命科学与食品工程学院,河北 邯郸 056000)

摘要:为改善素肉肠品质与风味,以大豆蛋白为基料,分别接种商业酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)32717和酿酒酵母13-1制备发酵大豆蛋白素肉肠,以未发酵大豆蛋白素肉肠为对照,采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)法、电子鼻、电子舌、色差仪及感官评价分析其挥发性风味物质、气味、滋味、颜色参数及感官评分。结果表明,菌株13-1、32717发酵大豆蛋白素肉肠组及对照组分别共检出24种、26种、21种挥发性风味物质,菌株13-1、32717发酵大豆蛋白素肉肠组中醇类、吡嗪类、醛类、呋喃类物质含量分别为164.38 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、220.91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、30.81 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、54.93 $\mu\text{g}/\text{kg}$;536.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、657.89 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、35.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、53.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。与对照组比较,发酵大豆蛋白素肉肠组醇类及吡嗪类物质含量显著增加($P<0.05$),醛类和呋喃类物质含量显著降低($P<0.05$)。电子鼻、电子舌分析结果表明,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠醇醛酮、芳香成分、硫化物等气味更丰富,滋味层次、鲜味强度及色泽更佳,损失率和挤压出汁率最低,分别为5.46%、0.62%,感官评分最高(88分)。

关键词:酿酒酵母;发酵大豆蛋白;素肉肠;气味;滋味;颜色;感官评价

中图分类号:TS201

文章编号:0254-5071(2026)02-0216-08

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.02.030

引文格式:王佳仪,王正荣,潘晓倩,等.不同酿酒酵母发酵大豆蛋白素肉肠品质分析[J].中国酿造,2026,45(2):216-223.

Quality analysis of soybean protein vegetarian sausages of fermented by different *Saccharomyces cerevisiae*

WANG Jiayi^{1,2}, WANG Zhengrong², PAN Xiaojian^{1*}, ZHAO Changwen², LIN Dongmei²

(1.China Meat Research Center, Beijing 100068, China; 2.College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract:To improve the quality and flavor of vegetarian sausages, using soy protein as the base material, fermented soy protein vegetarian sausage was prepared by inoculating commercial *Saccharomyces cerevisiae* 32717 and *S. cerevisiae* 13-1, respectively, and using unfermented soy protein vegetarian sausages as the control. The volatile flavor compounds, odor, taste, color parameters, and sensory scores were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), electronic nose, electronic tongue, colorimeter, and sensory evaluation. The results showed that a total of 24, 26 and 21 volatile flavor compounds were detected in the fermented soy protein vegetarian sausages inoculated with strains 13-1 and 32717 and in the control group, respectively. The contents of alcohols, pyrazines, aldehydes and furans in the soy protein vegetarian sausages fermented by strain 13-1 and 32717 were 164.38 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 220.91 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 30.81 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 54.93 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 536.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 657.89 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 35.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 53.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Compared with the control group, the contents of alcohols and pyrazines in the fermented soy-protein vegetarian sausage groups were significantly increased ($P<0.05$), and the contents of aldehydes and furans were significantly decreased ($P<0.05$). The electronic nose and electronic tongue analysis indicated that strain 13-1 fermented soy protein vegetarian sausage had richer odors of alcohols, aldehydes, ketones, aromatic components, sulfides, etc., better taste layers, umami intensity and color, the lowest loss rate and squeezed juice yield, which were 5.46% and 0.62%, respectively, and the highest sensory score (88 points).

Key words: *Saccharomyces cerevisiae*; fermented soybean protein; vegetarian sausage; odor; taste; color; sensory evaluation

随着全球人口的持续增长,预计到2050年,食品生产需求将增加60%^[1]。然而,传统的肉类生产方式在蛋白质转化效率方面存在显著不足,每生产1 kg动物蛋白就需要消耗6 kg植物蛋白。此外,消费者对肉类消费所带来的环境破坏、健康隐疾以及畜牧业相关的道德问题的关注度日益提高,促使他们将目光逐渐转向植物性食品^[2]。为了推动植物性饮食的普及,开发多样化、可持续的蛋白,打造创新又

诱人的肉类替代品,显得尤为关键。预计到2027年,全球植物肉市场规模将达到157亿美元,复合年增长率为14.7%^[3]。植物蛋白分离物和浓缩物是肉类替代品中常见的成分^[2]。然而,蛋白质分离物的生产过程较为耗水耗能,这对其可持续性提出了挑战^[4]。而蛋白质浓缩物虽然在生产成品和资源消耗方面具有一定的优势,但其在肉类替代品中的应用受到苦味、涩味、豆腥味等感官特性方面的限制,同时对其

收稿日期:2025-08-27

修回日期:2025-12-11

基金项目:国家重点研发计划(2024YFD2100204)

作者简介:王佳仪(2000-),女,硕士研究生,研究方向为食品微生物和发酵食品开发。

*通讯作者:潘晓倩(1987-),女,高级工程师,硕士,研究方向为畜产品加工与肉制品质量安全。

柔软度、紧凑度、干燥度等质地也有较高要求^[5]。大豆蛋白和浓缩物是素肉肠最常用的原料^[6],但目前的素肉肠在口感、风味和营养方面仍存在不足,需要通过技术手段进行改良^[7]。

近年来,植物蛋白的发酵技术被认为是一种能够显著改善肉类替代品风味和质地的有效手段^[8]。酵母作为一种重要的发酵微生物,具有独特的代谢特性,能够产生多种风味化合物,如醇类、酯类和酸类,这些物质可以赋予素肉肠更丰富的风味^[9]。冯静文等^[10-11]采用阿米塞毕赤氏酵母(*Pichia amethystinina*)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)对豆类物质进行发酵后,豆腥味特征气味物质未被检出,但酯类等芳香化合物的生成明显增加^[12]。通过微生物发酵可以分解大豆蛋白中的大分子物质,使其结构更加松散,更具弹性和咀嚼性^[13]。朱嵩^[14]利用高水分组织蛋白制作的发酵素肉肠弹性优于市售素肉肠和猪肉肠。杜洁晨^[15]以脱腥处理后的低水分组织蛋白制作发酵素肉肠,最终品质与市售肉类香肠类似。酵母菌在发酵过程中可以合成一些营养成分,如维生素B族和氨基酸,从而提高素肉肠的营养价值^[16]。赵畅雯^[17]从各地发酵食品中筛选出了一株产总酯量高达2.15 g/L的生香酵母菌13-1,通过形态学观察、生理生化鉴定、分子鉴定及系统发育树分析,鉴定为酿酒酵母,分离所得生香酵母菌应用于发酵大豆素肉肠中,减少大豆素肉肠豆腥味、改善素肉肠整体风味。此外,生香酵母发酵过程中可以抑制有害微生物的生长,减少生物胺等有害物质的生成,从而提高素肉肠的安全性。

本研究以从传统发酵剂—酵子中分离得到的酿酒酵母13-1及商业酿酒酵母32717为发酵菌株,分别接种到大豆蛋白粉基料中,制备发酵大豆蛋白素肉肠,以未发酵大豆蛋白素肉肠为对照,采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)结合气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)法、电子鼻、电子舌、色差仪等方法系统探究不同酿酒酵母菌株发酵素肉肠挥发性风味物质、气味、滋味、颜色参数差异,并对其进行感官评价。旨在为发酵大豆蛋白素肉肠工业化生产提供菌株选择的科学依据,为开发具有特色风味的发酵型植物基肉制品提供理论依据与技术支持。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

商业酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)32717:中国工业微生物菌种保藏中心;酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)13-1:中国肉类食品综合研究中心研究室传统发酵剂—酵子中分离并保存;正己烷(色谱纯):德国Merck公司;2-甲基-3-庚酮:美国Sigma-Aldrich公司;三氯甲烷、甲醇、氢氧化钠、氯化钠、酒石酸、氯化钾、盐酸、氢氧化钠、甲醇、葡萄糖、无水乙醚(均为分析纯):国药集团化学试剂有限责任公司;大豆蛋白粉、食盐、卡拉胶、植物油、蔗糖、谷氨酰

胺转氨酶(glutamine transaminase, TGase)(酶活120 U/g)、香辛料、变性淀粉、红曲红:市售。酵母浸出粉葡萄糖(yeast peptone dextrose, YPD)培养基、YPD肉汤培养基:北京陆桥技术股份有限公司。

1.2 仪器与设备

ME104电子分析天平:美国梅特勒-托利多公司;Alpha MOS α -Astree电子舌:北京盈盛恒泰科技有限责任公司;PEN3型电子鼻:德国Airsense公司;TRACE1310气相色谱-TSQ8000质谱仪、TG-Wax MS毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m):赛默飞世尔科技(中国)有限公司;Minolta Chroma Meter CR-200:日本Konica Minolta公司。

1.3 方法

1.3.1 菌种活化

在无菌条件下,取保存在甘油中的酿酒酵母13-1和商业酿酒酵母32717涂抹于YPD固体培养基进行复苏培养,置于28 $^{\circ}$ C条件下静置培养24 h。选择生长状态较好的单细胞,将其转移到YPD液体培养基中,28 $^{\circ}$ C、120 r/min条件下活化培养24 h,连续活化2~3次,放入4 $^{\circ}$ C冰箱备用^[18]。

1.3.2 发酵大豆蛋白粉制备

取100 mL水,加入15 g大豆蛋白粉和2 g葡萄糖,105 $^{\circ}$ C灭菌10 min,制成大豆蛋白液体培养基。将活化酿酒酵母13-1与商业酿酒酵母32717分别按2%的接种量接入大豆蛋白培养基中,以未接种酿酒酵母的大豆蛋白液体培养基作为对照。所有样品于28 $^{\circ}$ C、120 r/min条件下振荡培养24 h。发酵结束后,将发酵液分装于冷冻托盘,置于-40 $^{\circ}$ C预冷12 h后,于-50 $^{\circ}$ C冷冻干燥机内冻干24 h,得到发酵大豆蛋白粉,置4 $^{\circ}$ C冰箱保存。

1.3.3 大豆蛋白素肉肠的制备

发酵大豆蛋白素肉肠制作参考赵畅雯^[17]的方法。称取发酵大豆蛋白粉200 g、谷朊粉30 g、植物油120 g、水750 g、变性淀粉95 g、食用盐18 g、卡拉胶10 g、蔗糖30 g、味精5 g、大蒜粉10 g、红曲红0.5 g、TGase0.25 g、酵母提取物6 g,搅拌均匀后灌入塑料肠衣中,121 $^{\circ}$ C蒸煮20 min,冷却至室温后于-80 $^{\circ}$ C速冻保藏,即得发酵大豆蛋白素肉肠。

实验共分3组:以未发酵大豆蛋白素肉肠为对照组、菌株32717发酵素肉肠组、菌株13-1发酵素肉肠组。

1.3.4 大豆蛋白素肉肠挥发性风味物质测定

大豆蛋白素肉肠挥发性风味物质采用HS-SPME-GC-MS法^[19]测定,并稍作修改。

样品前处理:准确称量5 g大豆蛋白素肉肠和对照置于顶空采样瓶中,加入质量浓度为0.816 μ g/ μ L的2-甲基-3-庚酮(内标)溶液1 μ L,混合均匀,50 $^{\circ}$ C平衡10 min,将萃取纤维伸入顶部空间,50 $^{\circ}$ C萃取40 min。萃取完成后,将萃取纤维头插入气相色谱进样口,于250 $^{\circ}$ C解吸附5 min,用于GC-MS分析。

气相色谱条件:采用TG-Wax MS色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),不分流进样模式,载气为高纯氦气(He),初始流速1.0 mL/min持续2 min,进样口温度250 ℃。升温程序为初始温度40 ℃保持3 min,以5 ℃/min速率升至200 ℃并保持1 min,再以8 ℃/min的速率升温至220 ℃后保持3 min。

质谱条件:采用电子电离(electron ionization, EI)源,电子能量70 eV,离子源温度280 ℃,接口温度为260 ℃,传输线温度为230 ℃,采用全扫描模式,质量扫描范围40~400 m/z,扫描时间为2 s。

定性定量方法:将挥发性风味物质检测结果与美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)数据库进行对比,根据匹配度>800对挥发性风味物质进行初步定性,再计算各挥发性风味物质保留指数(retention index, RI),并与文献报道的保留指数进行比较,最终鉴定该物质。采用内标法进行定量分析。

1.3.5 大豆蛋白素肉肠气味电子鼻测定

参考梁二宏等^[20]的方法并略作修改。称取1 g发酵大豆蛋白素肉肠和对照放置于10 mL样品瓶中进行电子鼻检测,反应室温度为25 ℃。然后将顶空样品(500 μL)自动注入传感器室。传感器的响应通过电阻率(欧姆)进行测量。采样频率为1 Hz,采样时间为450 s,清洗时间为60 s,进气流速为200 mL/min,平行试验3次。电子鼻传感器的性能描述见表1。

表1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of electronic nose sensors

阵列序号	传感器名称	特性描述
1	W1C	对芳香成分、苯类灵敏
2	W5S	对氮氧化物灵敏
3	W3C	对氨类、芳香成分灵敏
4	W6S	对氢化物灵敏
5	W5C	对短链烷烃、芳香成分灵敏
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇醛酮类灵敏
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.3.6 大豆蛋白素肉肠滋味电子舌测定

电子舌方法参考周阿容等^[21]的方法并略作修改,将发酵大豆蛋白素肉肠和对照剪成小块后称取10 g与100 mL超纯水混合,在4 ℃下均质化60 s,然后于4 ℃、8 000×g条件下离心5 min,收集上清液用于电子舌检测。

1.3.7 大豆蛋白素肉肠颜色参数的测定

颜色参数的测定:采用色差计测定^[9],并稍作修改。将发酵大豆蛋白素肉肠和对照切成15 mm高的圆柱体,利用校准后的色差仪进行颜色参数测量,记录明亮度(L*值)、

红绿度(a*值)和黄蓝度(b*值)。每个样品做3个平行试验。

1.3.8 大豆蛋白素肉肠保水性的测定

蒸煮损失率的测定参考杜洁晨^[19]的方法稍作修改。准确称量发酵大豆蛋白素肉肠及对照组在煮制之前的质量,煮制之后,将其冷却至室温,用吸水纸擦干表面析出的水分和油脂,再次用天平称取其质量,每个样品重复检测3次。蒸煮损失率计算公式如下:

$$\text{蒸煮损失率} = \frac{\text{蒸煮前素肉肠质量/g} - \text{蒸煮后素肉肠质量/g}}{\text{蒸煮前素肉肠质量/g}} \times 100\%$$

挤压出汁率的测定参考夏军军等^[22]的方法稍作修改。将发酵素肉肠和对照切成厚为15 mm高的圆柱体,称量其质量,计为 m_1 (g),将其放在滤纸上,持续施加2 kg的压力,计时3 min,测定压缩后素肉肠切片的质量,计为 m_2 (g)。挤压出汁率计算公式如下:

$$\text{挤压出汁率} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$

1.3.9 大豆蛋白素肉肠感官评价

选取20名经过专业培训的感官评估人员,依据表2中的感官评价标准^[15],逐项对大豆蛋白素肉肠样品的滋味、气味、咀嚼感、外观形态及状态进行评价,大豆蛋白素肉肠感官评价标准见表2。

表2 大豆蛋白素肉肠感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation standards of soybean protein vegetarian sausages

项目	评价标准	分数/分
滋味(30分)	滋味适口,咸淡合适	21~30
	滋味适口,咸淡略淡	11~20
	滋味不适口,有很重咸味无味	1~10
气味(30分)	无异味	21~30
	略有豆腥味与酒味	11~20
咀嚼感(20分)	有较重豆腥味与酒味	1~10
	咀嚼性强,有肉感	16~20
	咀嚼性稍差,有肉感	10~15
外观形态(20分)	咀嚼性差,无肉感	1~9
	形态完整,气孔致密、弹性好	16~20
	形态较完整,气孔较致密、弹性较差	10~15
	形态不完整,气孔疏忽、无弹性	1~9

1.3.10 数据处理

所有试验均进行3次重复,结果以“平均值±标准差”表示。采用Microsoft Office Excel 2016软件处理数据;采用SPSS Statistics 20.0对数据进行显著性分析($P < 0.05$ 表示差异显著);利用OriginPro 2022进行绘图和主成分分析(principal component analysis, PCA),每次重复均设有3个平行样本,以确保数据的重复性和统计分析的可靠性。

2 结果与分析

2.1 大豆蛋白素肉肠挥发性风味物质分析

以未发酵大豆蛋白素肉肠为对照,采用HS-SPME-GC-MS对3种大豆蛋白素肉肠中挥发性风味物质进行测定,结果见表3。由表3可知,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中共检出24种挥发性风味物质,其中醇类4种,醛类3种,烯类3种,酚类4种,呋喃1种,吡嗪类7种,其他类2种。菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠中共检出23种挥发性风味物质,其中醇类4种,醛类3种,烯类3种,酚类3种,呋喃1种,吡嗪类

7种,其他类2种;对照组中共检出21种挥发性风味物质,其中醛类7种,烯类3种,酚类5种,呋喃1种,吡嗪类3种,其他类2种。菌株13-1、32717发酵大豆蛋白素肉肠中检测出醇类与吡嗪类最多,含量分别为164.38 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、220.91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、536.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、657.89 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。醛类、呋喃类物质含量分别为30.81 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、54.93 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、35.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、53.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。与对照组比较,发酵大豆蛋白素肉肠组醇类及吡嗪类物质含量显著增加($P<0.05$),醛类和呋喃类物质含量显著降低($P<0.05$)。

表3 大豆蛋白素肉肠挥发性风味物质含量分析结果

Table 3 Analysis results of volatile flavor compounds contents in soybean protein vegetarian sausages

序号	CAS号	化合物	香气描述 ^[1]	阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
					对照组	菌株13-1发酵 大豆蛋白素肉肠	菌株32717发酵 大豆蛋白素肉肠
1	470-82-6	按树醇	薄荷糖	1.1	ND	8.02±0.50a	9.56±0.20b
2	111-27-3	正己醇	树脂,花,绿色	5.6	ND	74.38±1.35a	111.59±2.50b
3	78-70-6	芳樟醇	花,薰衣草	0.01	ND	7.30±0.65a	10.15±0.45b
4	60-12-8	苯乙醇	蜂蜜、香料、玫瑰、丁香	0.015	ND	74.68±0.55a	89.61±0.45b
		小计				164.38±2.65a	220.91±3.56b
5	66-25-1	己醛	草、牛脂、脂肪	2.78	64.74±0.40a	24.33±0.20c	45.25±0.23b
6	124-13-0	正辛醛	脂肪、肥皂、柠檬、绿色	0.32	2.71±0.50	ND	ND
7	2548-87-0	反式2-辛烯醛	绿调、坚果、脂肪	0.34	2.22±0.05b	2.00±0.15b	3.00±0.25a
8	124-19-6	壬醛	脂肪、柑橘、绿色	1	19.07±1.50	ND	ND
9	188829-56-6	反式2-壬醛	黄瓜,脂肪,绿的	0.08	5.06±0.70	ND	ND
10	112-54-9	十二醛	脂肪	0.53	7.35±0.50	ND	ND
11	25152-84-5	反,反,2,4-癸二烯醛	油炸、蜡、脂肪	0.027	8.08±0.25a	4.48±0.05c	6.68±0.04b
		小计			108.93±3.70a	30.81±1.60c	54.93±2.52b
12	127-91-3	β -蒎烯	松木、树脂、松节油	6	15.45±0.35b	13.55±0.22c	16.45±0.25a
13	5989-27-5	D-柠檬烯	柑橘、薄荷	34	56.89±0.55a	50.11±1.50c	55.56±2.50b
14	87-44-5	1-石竹烯	木材、香料	64	68.38±0.45c	71.23±0.35b	82.33±0.75a
		小计			140.72±2.54b	134.89±1.56c	154.34±3.25a
15	620-17-7	3-乙基-苯酚	发霉	0.85	0.98±0.06	ND	ND
16	90-05-1	2-甲氧基苯酚	烟、糖、药	0.48	55.37±0.35a	37.95±0.51c	42.45±0.25b
17	2785-89-9	4-乙基-2-甲氧基-苯酚	香料、丁香	4.4	15.19±0.20b	15.07±0.40c	17.24±0.30a
18	97-53-0	丁香酚	丁香、蜂蜜	0.71	3.76±0.11b	4.00±0.23b	6.22±0.32a
19	7786-61-0	4-乙烯基-2-甲氧基-苯酚	丁香、咖喱	3	4.34±0.12a	4.63±0.13b	ND
		小计			79.64±3.35a	61.65±2.45c	65.91±1.36b
20	109-08-0	2-甲基吡嗪	爆米花	60	ND	157.74±5.50a	200.23±4.50b
21	123-32-0	2,5-二甲基吡嗪	可可、烤坚果、烤牛肉、药	80	ND	88.55±3.50a	120.25±4.50b
22	13925-03-6	2-乙基-6-甲基吡嗪	巧克力、咖啡、烤坚果香	40	ND	164.8±5.50a	180.24±6.50b
23	13360-64-0	2-乙基-5-甲基吡嗪	水果、甜	16	ND	36.23±0.30a	52.45±0.70b
24	13067-27-1	2,6-二乙基-吡嗪	坚果香、花生香	6	10.60±0.20b	8.83±0.40c	11.24±0.20a
25	13925-07-0	2-乙基3,5-二甲基-吡嗪	土豆	0.04	24.68±0.25c	33.31±0.15b	42.22±0.51a
26	13360-65-1	3-乙基2,5-二甲基-吡嗪	土豆、烧烤	0.4	16.74±0.20c	46.88±0.50b	51.26±0.30a
		小计			52.02±1.50c	536.34±2.53b	657.89±3.20a
27	624-92-0	二甲基二硫醚	洋葱、卷心菜	0.16	7.03±0.20ab	6.60±0.20b	7.43±0.30a
28	2179-57-9	二烯丙基二硫	蒜	30	202.99±2.25c	218.32±1.15b	228.43±2.15a
29	3777-69-3	2-正戊基呋喃	绿豆、黄油	5.8	60.83±0.50a	35.99±0.75c	53.76±0.56b

注:同一指标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),“ND”表示未检出。

醇类物质主要来源于微生物代谢、脂肪酸氧化降解、醛的还原反应^[24],大多数醇类物质具有果香、花香等良好风味,部分醇类物质具有不良风味。对照组中桉树醇、正己醇、苯乙醇、芳樟醇等均未检出,菌株3271发酵大豆蛋白素肉肠中桉树醇、正己醇、苯乙醇、芳樟醇含量分别为9.56 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、111.59 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、10.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、89.61 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中桉树醇、正己醇、苯乙醇、芳樟醇物质含量分别为18.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、74.38 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、7.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、74.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。芳樟醇主要来自于香辛料中^[25]。桉树醇可能来源于花椒粉^[26-27],增加了发酵大豆蛋白素肉肠的薄荷香和花香。正己醇为大豆蛋白的豆腥味来源之一,有显著的树脂味。苯乙醇为生香酵母的代谢产物,具有良好的玫瑰花香和蜂蜜甜香味,赋予发酵素肉肠强烈的醇香。结果表明,发酵有助于增加更丰富更愉悦的香气物质。

吡嗪类物质来源推测为大豆蛋白加热产生,具体途径为加工过程中氨基酸降解反应和焦糖化反应。对照组中2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪等均未检出,菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠中2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪含量分别为200.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、120.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、52.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪含量分别为157.74 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、88.55 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、36.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其中菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠比菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠吡嗪类物质含量高。其风味与煮熟的动物肉风味相似,是烧烤猪肉中的主体风味^[28],使发酵大豆蛋白素肉肠更接近烤猪肉的风味。

醛类物质阈值较低,易被人感知,是动物类熟肉中最重要的风味物质^[29],通常具有刺激性气味或不愉快的风味,主要来源于亚油酸、亚麻酸等多不饱和脂肪酸氧化以及蛋白质的氨基酸降解反应^[30]。对照组中壬醛、反式-2-壬醛、正辛醛、十二醛含量分别为19.07 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、5.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、2.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、7.35 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株13-1、32717发酵大豆蛋白素肉肠组中上述化合物均未检出。对照组中己醛、反式-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛含量分别为64.74 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、2.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、8.08 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株32717、13-1发酵大豆蛋白素肉肠中己醛、反式-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛含量分别为45.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、24.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、3.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、2.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、6.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、4.48 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠豆腥味显著降低,表明酿酒酵母对发酵大豆蛋白素肉肠的风味改良效果显著。

烯类物质通常具有木制、甜香或柑橘香气,能提升风味的层次。对照组中 β -蒎烯、*D*-柠檬烯及1-石竹烯含量分别为15.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、56.89 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、68.38 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株32717、菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中 β -蒎烯、*D*-柠檬烯及1-石竹烯含量分别为16.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、13.55 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、55.56 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、50.11 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、82.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、71.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。 β -蒎烯、*D*-柠檬烯及1-石竹烯呈现的清新柠檬香,则归因于所添加的香辛料。

酚类物质通常具有丁香、烟熏、发酵等香气,是风味的重要贡献者。菌株32717、菌株13-1发酵素肉肠组中3-乙基-苯酚均未检出,说明发酵减少了不良的发霉风味。对照组中2-甲氧基苯酚含量为55.37 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株32717、菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中2-甲氧基苯酚含量分别下降至42.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和37.95 $\mu\text{g}/\text{kg}$,说明发酵可以减少烟熏和药味,改善风味。对照组中丁香酚含量为3.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株32717、菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中丁香酚含量分别升高至6.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和4.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$,增强了丁香香气。

呋喃类物质中2-正戊基呋喃具有绿豆与黄油气味,是典型豆腥味标志物,也是亚油酸等不饱和脂肪酸经氧化反应生成^[31]。对照组中2-正戊基呋喃含量为60.83 $\mu\text{g}/\text{kg}$,菌株32717、菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠中2-正戊基呋喃含量分别下降至53.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、35.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。检出的二烯丙基二硫、二甲基二硫醚散发浓郁大蒜气息,应源自配料中的大蒜粉。

综上,酿酒酵母发酵大豆蛋白素肉肠中醇类与吡嗪类挥发性风味物质在种类和含量上均显著优于对照组;醛类等豆腥味代表物质大幅降低,且产生了具有烤香味的吡嗪及具有蜂蜜、玫瑰味的苯乙醇。由此可知,大豆蛋白经酿酒酵母发酵后制成的素肉肠香气层次更丰富,整体风味品质跃升。

2.2 大豆蛋白素肉肠气味电子鼻分析

电子鼻的传感器对样品的气味非常敏感,样品所含有挥发性风味化合物的微小变化都会导致不同的传感器响应^[23]。3种大豆蛋白素肉肠气味电子鼻分析响应值见图1。

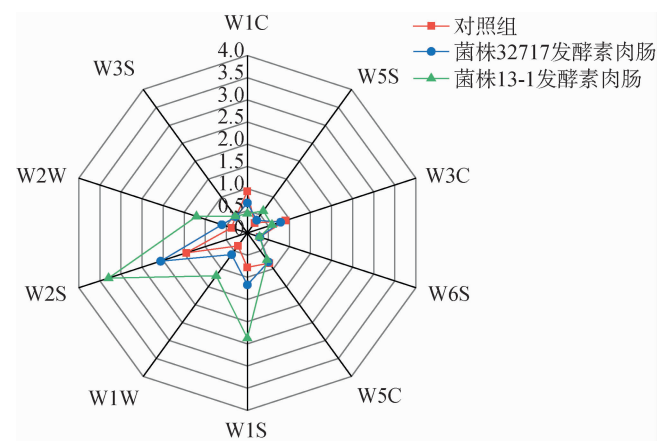


图1 大豆蛋白素肉肠电子鼻分析传感器响应值雷达图

Fig. 1 Radar plots of sensor response values of electronic nose analysis for soybean protein vegetarian sausages

由图1可知,3种大豆蛋白素肉肠在含甲基类,醇醛酮类以及硫化物的释放上表现出较明显的差异。发酵素肉肠在含甲基类、醇醛酮、硫化物以及芳香成分、有机硫化物敏感的传感器响应值(如W1S、W2S、W1W、W2W)比对照组更高,表明其含醇醛酮、芳香成分、硫化物等挥发性风味成分

更为丰富;其中菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠比菌株32717发酵素肉肠的醇醛酮、硫化物以及芳香成分、甲基类、有机硫化物、氮化合物传感器(W2S、W1W、W1S、W2W、W5S)响应值更高,说明酿酒酵母在促进这些风味物质形成方面更为高效,因而其整体香气轮廓更为浓郁。

2.3 大豆蛋白素肉肠滋味电子舌分析

电子舌可以检测到八种味道,包括酸味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、丰富性和咸味;其味觉阈值设定酸味感知强度为-13个标准单位,咸味感知强度为-6个标准单位,其余味觉属性感知强度均为零值,即低于该值表现为无味点^[32]。大豆蛋白素肉肠滋味电子舌分析响应值雷达图及主成分分析(principal component analysis,PCA)结果见图2。由图2A可知,酸味低于无味点,3种大豆蛋白素肉肠对电子舌不同传感器响应值有明显差异,响应强度为丰富性>鲜味>苦味>涩味>咸味,丰富性和鲜味指标响应值大于其余指标,丰富性是作为鲜味回味的判定指标^[33],与对照组相比,发酵大豆蛋白大豆蛋白素肉肠在丰富性与鲜味维度的传感器响应值均显著提升,其中菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠传感器响应值增幅最大,同时苦味与涩味的传感器响应值降低。

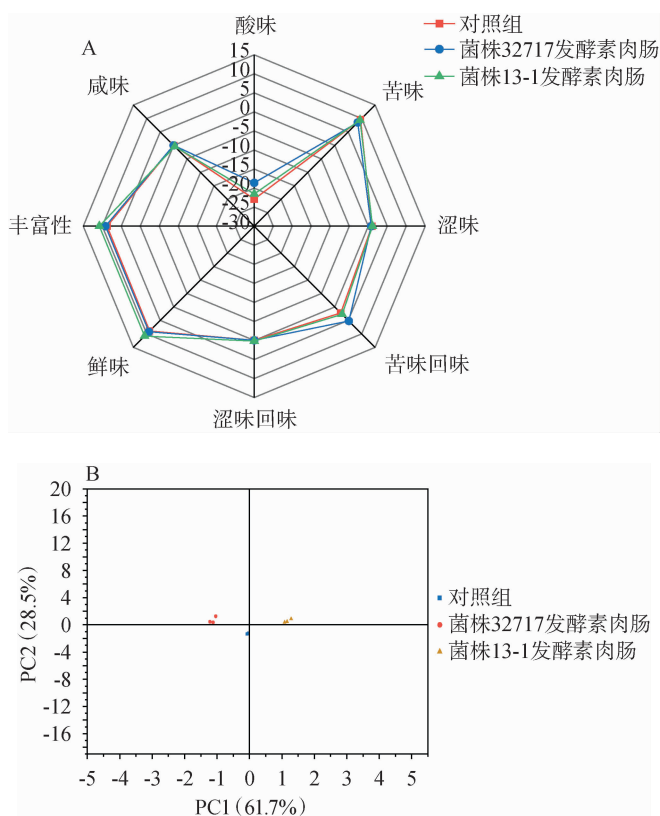


图2 大豆蛋白素肉肠滋味电子舌分析传感器响应值雷达图(A)及主成分分析(B)

Fig. 2 Radar plots (A) and principal component analysis (B) of sensor response values of e-tongue analysis for soybean protein vegetarian sausages

由图2B可知,主成分1(principal component,PC1)方差贡献率为61.7%,主成分2(PC2)方差贡献率为28.5%,两者累计方差贡献率>90%,说明这两种主成分可以基本反映大豆蛋白素肉肠样品滋味检测的完整情况,且PC1贡献率远高于PC2,以PC1的差异为主。3种大豆蛋白素肉肠无重叠且相隔较远,表明基于电子舌检测结果的主成分分析(PCA)可以有效区分三种大豆蛋白素肉肠。综合来看,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠在滋味层次、鲜味强度上表现最佳。

2.4 大豆蛋白素肉肠颜色参数分析

肉制品外观是影响消费者购买的主要因素,优良的外观比产品口感更重要^[34]。大豆蛋白素肉肠颜色参数测定结果见表4。由表4可知,3种大豆蛋白素肉肠红绿度(a^* 值)、黄蓝度(b^* 值)无显著差异($P>0.05$),但是在明亮度(L^* 值)上有显著差异($P<0.05$),其中菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠明亮度(L^* 值)比菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠低,是因为发酵过程中,水分蒸发,光纤散射减少,蛋白质变性和结构收缩,导致亮度下降^[32]。发酵后亮度适度降低是更优的表现,综合来看菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠颜色参数优于菌株32717发酵素肉肠。

表4 大豆蛋白素肉肠颜色参数测定结果

Table 4 Determination results of color parameters of soybean protein vegetarian sausages

组别	L^* 值	a^* 值	b^* 值
对照组	60.33±0.43a	6.48±0.12a	20.87±0.48a
菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠	56.47±1.23b	6.27±0.10a	20.84±2.34a
菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠	57.22±0.78b	6.31±0.15a	20.77±1.22a

注:同一指标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。

2.5 大豆蛋白素肉肠保水性分析

蒸煮损失率和挤压出汁率可以判断出素肉肠的保水性,3种大豆蛋白素肉肠保水性分析结果见表5。由表5可知,发酵大豆蛋白素肉肠和对照的蒸煮损失率和挤压出汁率有显著性差异($P<0.05$),发酵大豆蛋白素肉肠的蒸煮损失率和挤压出汁率均低于对照,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠组蒸煮损失率和挤压出汁率要比菌株32717发酵素肉肠组低,是因为酵母发酵过程中pH值降低导致蛋白质凝胶化及水分活度下降^[35],说明酿酒酵母发酵使大豆蛋白素肉肠的结构更加紧密,更耐挤压,保水性更好。综合保水性表现,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠的保水性优于菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠。

表5 大豆蛋白素肉肠蒸煮损失率、挤压损失率分析结果

Table 5 Analysis results of cooking loss rates and expressible moisture rates of soybean protein vegetarian sausages

组别	蒸煮损失率/%	挤压损失率/%
对照组	5.52±0.26a	0.66±0.08a
13-1发酵素肉肠	5.46±0.21c	0.62±0.13b
32717发酵素肉肠	5.48±0.56b	0.63±0.35b

2.6 感官评价

3种大豆蛋白素肉肠感官评价结果见表6。由表6可知,发酵大豆蛋白素肉肠各项感官评分均高于对照组,是因为酿酒酵母发酵产生的醇类、吡嗪类等芳香类化合物丰富了大豆蛋白素肉肠的滋味与气味,同时加速蛋白质降解,硬度下降,使得咀嚼感升高,从而改变其外观及状态^[16]。其中,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠组在滋味、咀嚼感、外观及状态四维度得分最高,所得大豆蛋白素肉肠感官评分最高,为88分,菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠感官评分为86分,香气亦明显增强,说明酿酒酵母发酵对大豆蛋白素肉肠感官品质有积极的改善作用。综合感官评价表现,菌株13-1发酵大豆蛋白素肉肠的感官品质最优,其次是菌株32717发酵大豆蛋白素肉肠,对照组最差。

表6 大豆蛋白素肉肠感官评价结果

Table 6 Sensory evaluation results of soybean protein vegetarian sausages

组别	滋味/分	气味/分	咀嚼感/分	外观及状态/分	总分/分
对照组	23±0.53b	23±0.62b	15±0.32a	17±0.45a	78±0.66c
13-1发酵素肉肠	27±0.22a	26±0.34a	17±0.44a	18±0.56a	88±0.78a
32717发酵素肉肠	25±0.35ab	27±0.53a	16±0.56a	18±0.67a	86±1.22b

3 结论

本研究系统探讨了利用商业酿酒酵母32717和酿酒酵母13-1发酵制备大豆蛋白素肉肠对其风味、色泽、保水性及感官品质的影响。结果显示,通过发酵改变了挥发性风味物质的组成和含量,显著促进了醇类物质(苯乙醇、芳樟醇)和吡嗪类物质(2,5-二甲基吡嗪、2-甲基吡嗪)的生成,这些物质赋予大豆蛋白素肉肠浓郁的醇香和烤香味,同时显著降低了醛类(如己醛、反式2-壬醛)等豆腥味相关物质含量。此外,发酵还降低了大豆蛋白素肉肠的苦味和咸味,提升了鲜味和风味丰富度,使整体风味更加浓郁、自然。通过发酵降低了大豆蛋白素肉肠的亮度和挤压出汁率,使其色泽更加自然,提升了保水性。基于感官评分,通过发酵提高了大豆蛋白素肉肠的滋味、气味、咀嚼感、外观及状态。其中菌株13-1发酵素肉肠挥发性风味物质最为丰富,滋味层次、鲜味强度上表现最佳,颜色最佳,蒸煮损失率和挤压出汁率最低,感官评分最高(88分)。综合来看,利用酿酒酵母13-1发酵在改善大豆蛋白素肉肠的风味、滋味和保水性方面表现出色。本研究为植物基素肉肠的品质优化提供了一种有效且可行的解决方案,具有较好的推广应用前景。

参考文献:

[1] World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.2012[R]. Viale delle Terme di Caracalla: FAO, 2012.
[2] WANG Y, TUCCILLO F, LAMPI A M, et al. Flavor challenges in extruded

plant-based meat alternatives: A review[J]. **Compr Rev Food Sci Food Safe**, 2022, 21(3): 2898-2929.
[3] PRASAD S, GUPTA E, YADAV S, et al. Plant-Based Food Industry: Overview and Trends[J]. **Future Plant Prot**, 2025, 73-97.
[4] SCHUTYSER M A. Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates[J]. **Trend Food Sci Tech**, 2015, 45(2): 327-335.
[5] FLORES M, PIORNOS J A. Fermented meat sausages and the challenge of their plant-based alternatives: A comparative review on aroma-related aspects[J]. **Meat Sci**, 2021, 182: 108636.
[6] KYRIAKOPOULOU K, KEPPLER J K. Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues[J]. **Foods**, 2021, 10(3): 600.
[7] KALEDA A, TALVISTU K, TAMM M, et al. Impact of fermentation and phytase treatment of pea-oat protein blend on physicochemical, sensory, and nutritional properties of extruded meat analogs[J]. **Foods**, 2020, 9(8): 1059.
[8] BONNARME P, FRAUD S. Sensory improvement of a pea protein-based product using microbial co-cultures of lactic acid bacteria and yeasts[J]. **Foods**, 2020, 9(3): 349.
[9] 康艳丽,陈作林,曾小波,等. 酱醪生香酵母的选育及其生长动力学研究[J]. **中国酿造**, 2023, 42(4): 118-124.
[10] 冯静文. *Pichia amethionina* Y 的分离鉴定及去除豆腥味研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
[11] 唐巧. 酵母菌发酵大豆粉去除豆腥味的研究及其应用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
[12] 张关锋,曾文林,郑梦莉,等. 微生物发酵饲料的特性及其在动物生产中的应用研究进展[J]. **饲料工业**, 2023, 44(18): 79-85.
[13] JIN Z, JIA X, ZHENG Y, et al. A review of the development of fermented sausage[J]. **J Food Nutr Sci**, 2018, 7(4): 338-343.
[14] 朱嵩. 基于高水分挤压技术的花生蛋白素肠制备及其贮藏特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
[15] 杜洁晨. 大豆组织蛋白质结构调整及其在素肉香肠中的应用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
[16] 范鑫洋,张香美,刘程鹏,等. 酿酒酵母Y-8对发酵香肠品质与风味的影响[J]. **食品科学**, 2024, 45(7): 119-126.
[17] 赵畅雯. 生香酵母发酵物香气特征及其在素肉制品中应用研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
[18] 黄河浪,刁于真,杨白雪,等. 可同化阿拉伯糖的木糖还原酿酒酵母菌株构建[J]. **微生物学报**, 2020, 60(12): 2705-2716.
[19] 潘晓倩,周慧敏,李素,等. 卤牛肉贮藏过程中气味活性化合物变化及异味分析[J]. **食品科学**, 2021, 42(22): 240-248.
[20] 梁二宏,赵燕,闵成军,等. 梯度升温杀菌和高温杀菌对番茄炖牛腩品质差异分析[J]. **食品科学**, 2025, 29(7): 1-16.
[21] 周阿容,揭小玲,杨阳,等. 电子感官技术结合人工感官评价3种食用菌素肉排风味[J]. **福建农业科技**, 2024, 55(3): 1-7.
[22] 夏军军,李洪军,贺稚非,等. 不同腌制方式对牛肉品质特性的影响[J]. **西南大学学报(自然科学版)**, 2016, 38(2): 12-19.
[23] 刘元林,龙鸣,张希,等. 基于电子鼻与多元统计分析判别三七品质[J]. **中成药**, 2021, 43(3): 700-707.
[24] CHEN H, NIE X, PENG T, et al. Effects of low-temperature and low-salt fermentation on the physicochemical properties and volatile flavor substances of Chinese kohlrabi using gas chromatography-ion mobility

- spectrometry[J]. **Fermentation**, 2023, 9(2): 146.
- [25] GORSKA E, NOWICKA K, JAWORSKA D, et al. Relationship between sensory attributes and volatile compounds of polish dry-cured loin[J]. **Asian-Aust J Animal Sci**, 2016, 30(5): 720.
- [26] 姬雪可, 杨璐, 郑丽敏. 应用气相色谱-质谱联用与感官评价分析猪肉丸子风味[J]. **肉类研究**, 2017, 31(7): 44-49.
- [27] 徐力. 复合微生物发酵豆粕产蛋白饲料的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [28] 朱秀清, 张宾洋, 孙冰玉, 等. 大豆蛋白素肉风味影响研究进展[J]. **食品科学**, 2022, 44(5): 18-28.
- [29] 马兰雪. 植物基块状脂肪替代物及其在红肠中的应用研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
- [30] TANIMOTO S, KITABAYASHI K, FUKUSIMA C, et al. Effect of storage period before reheating on the volatile compound composition and lipid oxidation of steamed meat of yellowtail *Seriola quinqueradiata*[J]. **Fish Sci**, 2015, 81(6): 1145-1155.
- [31] 张彩猛. 豌豆源挥发性异味成分的生成机理与低异味豌豆分离蛋白加工工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [32] 杨银, 梁建兰. GC-MS结合电子鼻、电子舌分析6种糖炒燕山板栗的风味成分[J]. **食品工业科技**, 2024, 45(2): 269-279.
- [33] LI L X, ZHANG H, LIN Y H, et al. Identification of *Panax notoginseng* powders from different root parts using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry[J]. **Food Sci**, 2023, 44(20): 321-329.
- [34] GOETSCH A L, MERKEL R C, GIPSON T A. Factors affecting goat meat production and quality[J]. **Small Rumin Res**, 2011, 101(1-3): 173-181.
- [35] 王雍雍, 陈磊, 魏从娇, 等. 功能菌株复配对发酵香肠抗氧化特性及风味的作用[J]. **食品科学**, 2023, 44(22): 149-157.