

白萝卜粉作为亚硝酸盐来源制备猪肉发酵干香肠

闫瑞¹, 唐敏¹, 陈东方¹, 黄师荣^{1*}, 梅新²

(1.湘潭大学化工学院, 湖南湘潭 411105; 2.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 评价用白萝卜粉代替亚硝酸盐制备猪肉发酵干香肠的可行性。采用萨科VBM-60复合菌株作发酵剂, 制备4组香肠: NC组(不添加硝酸盐或亚硝酸盐的阴性对照组)、PC组(添加150 mg/kg亚硝酸钠的阳性对照组)、R0.5组(添加0.5%白萝卜粉组)、R1组(添加1%白萝卜粉组)。研究加工和贮藏过程中白萝卜粉代替亚硝酸盐对猪肉发酵干香肠理化性质、微生物性质及感官性质的影响。结果表明: 与添加150 mg/kg亚硝酸钠的对照组相比, 添加0.5%白萝卜粉的香肠具有较高硫代巴比妥酸反应物值和较好外观, 以及较低的pH值、红度值、硬度和咀嚼性, 而水分含量、挥发性盐基氮值、亮度值、弹性、内聚性、菌落总数、组织状态、色泽和风味总体上差异不显著。在贮藏过程中, R0.5组香肠具有较高的亚硝酸盐含量和较低的乳酸菌数。R0.5组香肠在加工和贮藏结束时的亚硝酸盐含量分别为13.03 mg/kg和16.48 mg/kg, 均符合国家规定的限定标准。结果表明, 添加0.5%的白萝卜粉可在一定程度上作为天然亚硝酸盐来源, 用于生产猪肉发酵干香肠。

关键词: 白萝卜粉; 发酵干香肠; 亚硝酸盐; 理化性质; 感官性质

Preparation of Dry Fermented Pork Sausage Using Radish Powder as a Source of Nitrite

YAN Rui¹, TANG Min¹, CHEN Dongfang¹, HUANG Shirong^{1*}, MEI Xin²

(1. College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Institute of Agro-product Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: The feasibility of using white radish powder as a nitrite substitute in dry fermented pork sausages was evaluated. Four groups of sausage were prepared by using a multi-strain starter culture (VBM-60, Sacco): negative control (NC, without nitrate or nitrite), positive control (PC, with 150 mg/kg sodium nitrite), 0.5% white radish powder (R0.5), and 1% white radish powder (R1). The effects of nitrite substitution by white radish powder on the physicochemical, microbiological and sensory characteristics of dry fermented sausage during production and storage were investigated. The results showed that compared with the positive control group, the R0.5 group had higher thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) values, better visual appearance, and lower pH, redness value, hardness and chewiness. However, no significant difference was observed in moisture content, total volatile basic nitrogen (TVB-N) value, brightness value, elasticity, cohesiveness, total bacterial count, tissue morphology, color or flavor. During storage, the R0.5 group had higher content of nitrite and lower count of lactic acid bacteria. The nitrite content in the R0.5 group was 13.03 and 16.48 mg/kg at the end of the production and storage process, respectively, which are below the national standard limit. The results indicated that 0.5% white radish powder can be used as a natural source of nitrite for the production of dry fermented sausage.

Keywords: white radish powder; dry fermented sausage; nitrite; physicochemical properties; sensory properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220713-138

中图分类号: TS251.65

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)08-0101-08

引文格式:

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.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220713-138. <http://www.spkx.net.cn>

YAN Rui, TANG Min, CHEN Dongfang, et al. Preparation of dry fermented pork sausage using radish powder as a source of nitrite[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 101-108. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220713-138. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(19A470)

第一作者简介: 闫瑞(1998—)(ORCID: 0000-0003-4697-5738), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉制品贮藏与加工。

E-mail: yanrui1115@163.com

*通信作者简介: 黄师荣(1974—)(ORCID: 0000-0002-9657-7079), 男, 副教授, 博士, 研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: hwangee@163.com

发酵香肠是指将绞碎的肉和动物脂肪同盐、糖、香辛料等混合后灌进肠衣,在自然或人工加入发酵剂的情况下,经过微生物的发酵活动和成熟干燥(或不经成熟干燥)而制成,具有稳定微生物特性和典型发酵香味以及良好耐贮藏性、高营养、易消化吸收的一类发酵肉制品^[1]。肉类腌制过程中,常加入硝酸盐和亚硝酸盐,起到赋予食品特有的红色外观、抑制有害微生物生长、提高抗氧化稳定性、改善产品风味等作用^[2]。然而,亚硝酸盐自身毒性较强,可转化为亚硝酸,能和肉制品或胃中次级胺类物质反应产生亚硝胺类化合物,从而诱发消化系统癌症^[3]。2015年10月,世界卫生组织的癌症机构——国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将加工肉制品(经腌制、发酵、熏制或其他过程改善风味或贮藏的肉类)归类为对人类有致癌性(第1组)^[4]。因此,“天然”和“有机”这类清洁标签食品获得了越来越多消费者的好感,寻找化学合成亚硝酸盐替代品也成为了国内外学者的研究重点。

有研究发现,将芹菜^[5-8]、菠菜^[8-10]、甜菜根^[11-12]等富含硝酸盐的果蔬与能将硝酸盐转化为亚硝酸盐的发酵剂结合是降低肉制品中亚硝酸盐含量并能保证其品质的有效途径。将蔬菜中硝酸盐作为亚硝酸盐的天然来源,可以通过自然代谢降低其在产品中的残留,从而提高产品的安全性。此外,蔬菜的营养成分还可提高肉制品中膳食纤维、维生素等营养品质。但有关白萝卜粉作为亚硝酸盐的来源研究还比较少。据报道,新鲜白萝卜中硝酸盐含量高达2 500 mg/kg^[13],在发酵肉制品加工中替代亚硝酸方面有很大潜力。

因此,本研究将白萝卜粉以一定量添加至发酵香肠中,利用添加的发酵剂和萝卜粉中自带的菌种把萝卜粉中的硝酸盐转化为亚硝酸盐,从而代替化学合成亚硝酸盐的添加。目的是在得到与添加亚硝酸盐的发酵香肠感官性能相同或相似的发酵香肠的同时,避免硝酸盐和亚硝酸盐的直接添加,从而减少人工合成食品添加剂的使用,得到清洁标签的肉制品,满足消费者对清洁标签食品的需求^[1]。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

猪后腿肉、肠衣、食盐、白糖、香辛料(花椒、桂皮、八角、茴香、丁香等) 湖南省湘潭市步步高超市;新鲜白萝卜 湖南省湘潭市蔬菜批发市场;VBM-60发酵剂(木糖葡萄球菌、肉糖葡萄球菌、戊糖片球菌、乳酸片球菌) 上海昊岳食品科技有限公司。

亚硝酸钠、硼酸钠 国药集团化学试剂上海有限公司;抗坏血酸、对氨基苯磺酸 国药集团化学试剂

有限公司;亚铁氰化钾、乙酸锌、盐酸萘乙二胺 上海麦克林生化科技有限公司;MRS(De Man, Rogosa and Sharpe)琼脂、平板计数琼脂(plate count agar, PCA) 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司;乙二胺四乙酸二钠、三氯乙酸、2-硫代巴比妥酸 天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BL-320H电子天平 日本岛津公司;304高速多功能粉碎机 浙江省永康市铂欧五金制品有限公司;DJQQLS128-C强力台式绞切两用机 江苏省镇江浩文机械有限公司;101-1AB电热鼓风干燥箱、HWS-150B恒温恒湿培养箱 天津泰斯特仪器有限公司;CR-400色差仪 日本Konica Minolta公司;PHS-3BW精密pH计 上海般特仪器有限公司;KT200凯氏定氮仪 丹麦福斯科科技有限公司;DY04-13-44-00压力蒸汽灭菌锅 上海东亚压力容器制造有限公司;FT-200高速分散均质机 上海标本模型厂;DL-6M大容量冷冻离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;Cary 60紫外-可见分光光度计 安捷伦科技(中国)有限公司;Universal TA质构仪 上海腾拔仪器科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 白萝卜粉制备

市售新鲜白萝卜用直径为7 mm×7 mm的刨丝器刨成细丝。将萝卜丝在日光下晾晒3 d,直至含水量达到20%左右,放入40℃干燥箱中干燥60 h,再用粉碎机粉碎,过60目筛备用。经测定,白萝卜粉硝酸盐含量为(15 725.20±190.86) mg/kg。

1.3.2 发酵干香肠制备

1.3.2.1 香肠配方

各组香肠瘦肉与肥肉质量比为8:2,辅料添加量以肉质量计:食盐2%、白糖1%、料酒8%、香辛料1%、抗坏血酸0.05%、发酵剂VBM-60 0.02%。实验设置4组:1) NC组:不添加硝酸盐或亚硝酸盐的阴性对照组;2) PC组:添加150 mg/kg亚硝酸钠的阳性对照组;3) R0.5组:添加质量分数为0.5%的白萝卜粉组;4) R1组:添加质量分数为1%的白萝卜粉组。

1.3.2.2 工艺流程

发酵干香肠加工工艺:原料肉处理→制馅→搅拌(加入辅料及发酵剂)→腌制→灌肠→发酵→干燥成熟(低温)→真空包装→冷藏。

1.3.2.3 操作要点

原料肉处理:选用新鲜、色泽鲜红、无污物的猪后腿肉。去皮和筋膜后用清水冲洗几次,直至肉的表面没有血渍和污物。

制馅:把瘦肉切成5 cm×5 cm×5 cm的肉块,和肥肉一同加入绞肉机绞碎、混匀(筛板孔径为10 mm)。

搅拌、腌制：将发酵剂与辅料预混合后加入至绞碎后的肉中，搅拌至混料均匀，4℃下腌制24 h。

灌肠：用清水将浸泡好的肠衣洗净，灌肠时，必须保证肠体紧实饱满，如有气泡产生，用牙签扎破肠衣，将气体排出。用温水清洗灌好的香肠，去除表面的料液和浮油，使其干净光滑。

发酵、成熟：将清洗后的香肠挂在恒温恒湿培养箱中进行发酵成熟，整个过程为24 d，在此期间设定温度和相对湿度的变化如下：第1天，30℃、85%；第2天，15℃、85%；第3~5天，13℃、75%；第6~14天，15℃、75%；第15~24天，15℃、70%。当香肠水分含量为21%~25%时，即完成干燥成熟。发酵成熟过程中，若香肠表面有霉菌生长，可用15%生理盐水沾湿纱布擦拭^[14]。

包装、冷藏：将最终成品真空包装并于4℃贮藏30 d。

1.3.3 发酵干香肠的理化和微生物分析

在香肠加工第0、3、6、9、12、15、18、21、24天分别取样，用于分析发酵香肠水分含量、pH值、亚硝酸盐含量、色泽；在加工第0、5、10、15、20、24天测定香肠的硫代巴比妥酸反应物（thiobarbituric acid reactive substance, TBARS）值、挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen, TVB-N）值、菌落总数、乳酸菌数。制作结束后对发酵干香肠进行感官评价和质构分析。加工阶段结束时，开始贮藏期（成熟的第24天相当于贮藏的第0天）。贮藏期内，每10 d进行1次理化指标测试，每15 d进行1次微生物指标测试。

1.3.3.1 水分含量测定

按照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》直接干燥法测定^[15]。

1.3.3.2 pH值测定

参考黄业传等^[16]的方法并适当修改。准确称取5.0 g样品，均匀研碎后，与45 mL蒸馏水混匀，室温下浸提30 min，过滤，取滤液测定其pH值。

1.3.3.3 亚硝酸盐残留量测定

参考Chen Xi等^[17]测定香肠中亚硝酸盐含量的方法，通过使用盐酸萘乙二胺的比色法测定亚硝酸盐残留量（mg/kg）。

1.3.3.4 发酵香肠色泽测定

每个样品制成约1 cm厚的均匀切片，用保鲜膜包裹其切面，对色差仪进行校正后，把镜口紧贴切面（镜口直径8 mm），测定其色泽。

1.3.3.5 TBARS值的测定

参照倪思思^[18]的方法，TBARS检测结果以每千克样品中丙二醛含量表示（mg/kg）。

1.3.3.6 TVB-N值的测定

按照GB 5009.228—2016《食品中挥发性盐基氮的测定》中自动凯氏定氮仪法，使用FOSS KT200凯氏定氮仪

进行TVB-N测量^[19]。结果以每100 g样品中TVB-N含量表示（mg/100 g）。

1.3.3.7 菌落总数和乳酸菌数的测定

按照GB 4789.2—2016《食品微生物学检验 菌落总数测定》^[20]和GB 4789.35—2016《食品微生物学检验 乳酸菌检验》^[21]中平板计数法检测样品中菌落总数和乳酸菌数，分别采用PCA和MRS培养基。

1.3.4 质构分析

参照肖亚庆^[22]的方法稍作修改。香肠样品去肠衣，从不同部位准确切取3块高度约为10 mm的样品，使用P10探头，在质构剖面分析（texture profile analysis, TPA）模式下进行测定，每块样品测定2次。检测参数为：测前速率1 mm/s，测中速率1 mm/s，测后速率1 mm/s，压缩程度30%，停留时间3 s，触发值8 g。分析样品的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性。

1.3.5 感官评定

由10名经过专业培训的研究生，在发酵成熟完成后对成品进行感官评定。评价前，把香肠置于蒸锅中隔水蒸煮20 min，待温度稍降后，取出并切成约5 mm薄片，每个处理取3块，置于一次性塑料盘中。用评分法对样品的外观、色泽、组织形态、风味进行感官评定^[23]，评定标准见表1。评价人员在评价过程中使用清水漱口，避免相互干扰。

表1 感官评价标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of dry fermented sausage				
评分标准	0~7	8~13	14~19	20~25
外观	肠体松散无规则，肠衣湿润、发黏，肠体与肠衣分离，易撕裂	肠体松散，肠衣稍微湿润或发黏，易与肉分离，但不易撕裂	肠体较为饱满，肠衣略微湿润，但不发黏	肠体饱满紧实，肠衣完整，不易与肉分离，不发黏
组织形态	韧性差，切面不平整，有明显裂痕，中心部位软化	韧性较差，切面较整齐，有裂痕，边缘部分有软化现象	有韧性，切面较整齐，无明显裂痕，咀嚼性较好	坚实有韧性，切面整齐，无裂痕，咀嚼性好
色泽	整个肉馅无光泽，肌肉灰暗无光，脂肪显黄色	部分肉馅有光泽，肌肉显咖啡色，脂肪显黄色	切面光泽度较差，肌肉黑红色，脂肪白色或微带黄色	切面有光泽，瘦肉呈红色、枣红色，脂肪为乳白色
风味	无香味，酸味难以接受，有肉腥味	香味不明显，滋味一般，酸味勉强接受，稍有肉腥味	香味明显，滋味一般，酸味可接受，无肉腥味	腊味芳香浓郁，有特殊酸味接受性非常高，无肉腥味等异味

1.4 数据处理

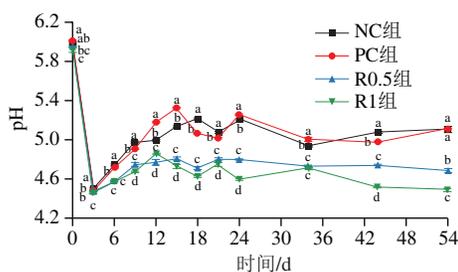
除色泽测定4次外，其余理化和微生物指标每组样品平行测定3次。实验数据处理和分析采用SPSS 20.0和Excel 2016软件，结果表示为 $\bar{x} \pm s$ 。以Duncan检验法进行显著性检验（ $P < 0.05$ ），用Origin 2018软件绘图。

2 结果与分析

2.1 加工和贮藏期间pH值的变化

由图1可知，4组香肠的初始pH值均在5.90~6.03

左右。随着成熟时间延长, 各组pH值在开始3 d内急剧下降, 然后逐渐上升, 接着稍微下降后趋于平稳。发酵初期, 复合发酵剂中的乳酸片球菌和戊糖片球菌迅速生长繁殖, 利用配料中的糖等碳水化合物快速产酸增加了发酵香肠的酸度^[24]。发酵中期, 由于蛋白酶的作用, 瘦肉中的蛋白质分解产生碱性物质如生物胺、游离氨基酸对发酵环境的酸有一定缓冲作用^[25], 导致pH值回升。15~24 d, pH值产生波动, 这一变化可能是因为脂质水解产生游离脂肪酸以及游离脂肪酸随后的分解代谢。此外, 随着干燥过程进行, 发酵香肠中水分含量逐渐降低, 酸性物质相对被浓缩。这些作用共同影响体系的pH值, 造成pH值波动。贮藏过程中对照组pH值逐渐增加, 而添加萝卜粉香肠的pH值则显著下降。这可能是因为在贮藏过程中, 对照组中的发酵菌继续分解香肠中的蛋白质产生碱性物质, 使其pH值逐渐增加; 而添加萝卜粉的香肠中发酵菌除了对肉中的成分进行分解以外, 还对萝卜粉进行了发酵。贮藏过程中, 可能后者对前者产生了抑制作用, 从而导致体系pH值的下降。



同一时间不同加工组间字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图1 香肠在加工和贮藏期间pH值的变化

Fig. 1 Changes in pH of dry fermented sausage during the processing and storage periods

2.2 加工过程中水分含量的变化

由图2可知, 发酵开始时, 各组样品的水分质量分数在64.0%~66.0%之间。随着时间的延长, 水分含量不断下降。水分含量下降使香肠内部水分活度降低, 从而抑制不良微生物的生长繁殖。最终水分质量分数都降低至25%以下, 这也是香肠成熟的标志。发酵前期(0~9 d), 4组香肠的水分散失速度很快, 其原因主要是肠馅中含有大量的游离水, 且pH值降低到接近蛋白质的等电点(pH 5.2)时, 可以促使蛋白质凝胶化, 肌肉蛋白的保水力减弱, 从而加快了香肠的干燥速度^[26]。发酵后期, 香肠表面有一定程度的变硬, 且内部的水分转移到表面需要一定时间, 使得香肠水分散失的速度变慢。4组样品中, PC组水分含量在整个加工过程(除加工第15天)中与R1组差异不显著($P > 0.05$), 在加工12~15 d显著高于NC和R0.5组。表明亚硝酸盐和萝卜粉具有一定的结合水能力。加工结束时(24 d) R0.5组的水分质量分数为

19.83%, 显著低于R1组和PC组($P < 0.05$)。朱紫玉等^[27]在研究添加东北酸菜粉对乳化香肠贮藏期品质变化的影响时也得到了类似结果。

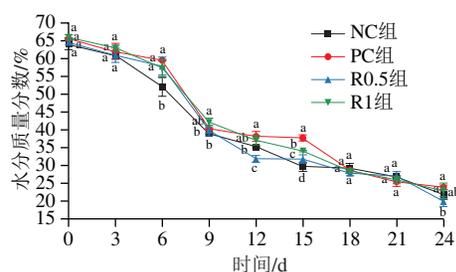


图2 香肠在加工过程中水分含量的变化

Fig. 2 Changes in moisture content of dry fermented sausage during processing

2.3 加工和贮藏期间亚硝酸盐含量的变化

如图3所示, PC组亚硝酸盐含量初始值高达(222.31 ± 1.44) mg/kg, 在3 d内迅速降低至(13.23 ± 0.32) mg/kg, 与R0.5组(亚硝酸盐含量为(13.77 ± 0.13) mg/kg)无显著差异($P > 0.05$)。4组香肠(NC组、PC组、R0.5组、R1组)的亚硝酸盐含量随着发酵成熟时间的延长, 整体呈现出先上升后下降趋势。造成这一结果的原因可能是早期香肠内的硝酸盐还原菌繁殖较多, 将硝酸盐转化成亚硝酸盐, 在12~15 d达到峰值。然后由于乳酸菌大量繁殖, 产生乳酸, 不利于硝酸盐还原菌的生长, 故亚硝酸盐含量逐渐减少。低pH值环境也可促使亚硝酸盐分解, 减少残留的 NO_2^- 与二级胺作用生成亚硝胺的可能性^[28]。加工结束时(24 d), NC组、PC组、R0.5组和R1组的亚硝酸盐含量分别为3.13、11.68、13.03、26.50 mg/kg, 均符合国家规定的限定标准(30 mg/kg)。NC组中检测到的亚硝酸盐可能是因为原辅料中含有微量亚硝酸盐的缘故。贮藏期内, 各组香肠的亚硝酸盐含量整体呈先上升后略有下降趋势, 原因可能是随着贮藏时间的延长, 香肠中的硝酸盐持续转化为亚硝酸盐, 使亚硝酸盐含量升高; 同时, 亚硝酸盐被微生物分解形成NO, NO与肌红蛋白反应形成稳定的亚硝基肌红蛋白, 且亚硝酸根还会与巯基物质发生反应, 从而降低了亚硝酸盐含量^[29]。发酵开始(0 d)时, PC组亚硝酸盐含量显著高于其他3组($P < 0.05$)。4组香肠在发酵3 d后一直到贮藏期结束, R1组亚硝酸盐含量最高, NC组最低。加工9~12 d, R0.5组和PC组的亚硝酸盐含量差异不显著, 21 d后一直到贮藏期结束, R0.5组的亚硝酸盐含量则显著高于PC组($P < 0.05$)。陈景鑫^[30]研究亚麻籽粉和番茄粉的添加对鸡肉香肠品质特性的影响时发现, 加入亚麻籽粉和番茄粉后降低了香肠的亚硝酸盐残留量。

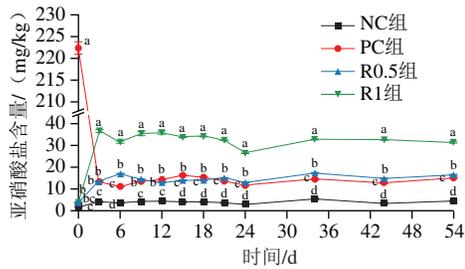


图3 香肠在加工和贮藏期间亚硝酸盐含量的变化

Fig. 3 Changes in nitrite content of dry fermented sausage during processing and storage

2.4 加工和贮藏期间香肠色泽的变化

如表2所示，4组香肠的L*值总体呈短暂上升再下降趋势。短暂上升是由于0~3 d亚硝酸盐含量迅速增高，其较强的发色作用使香肠亮度提高。之后随着香肠水分含量不断降低，亮度值也随之下落。Maristela等^[12]认为发酵干燥过程中，香肠水分的损失和色素的形成会引起产品颜色的变化。4组香肠的L*值在6~9 d均出现较大幅度降低，这也与4组香肠在该阶段水分含量大量减少相对应。绝大部分加工和贮藏期中，R0.5组的L*值与NC组和PC组差异不显著。R1组的L*值在加工3~9 d显著低于NC组和PC组 ($P < 0.05$)，这可能是由于萝卜粉在制作过程中发生美拉德反应产生灰褐色色素，导致香肠的L*值降低；也可能是由于白萝卜含有较多的酚类，这些酚类物质容易被氧化成醌类物质，醌类物质会形成灰色物质，从而使香肠的L*值降低。姜蕾等^[31]在利用迷迭香提取物制作萨拉米香肠时也得到类似结果。此外，加工18~21 d，R1组的L*值显著高于NC组 ($P < 0.05$)，但与PC组相差不大。R0.5组和R1组的L*值在加工的大部分时间内差异显著，但在贮藏期则没有显著差异 ($P > 0.05$)。

表2 香肠在加工和贮藏期间L*的变化

Table 2 Changes in L* value of dry fermented sausage during processing and storage

时期	时间/d	NC组	PC组	R0.5组	R1组
加工	0	58.18±4.74 ^{Ba}	57.05±1.33 ^{Bab}	54.79±0.78 ^{Bab}	52.37±0.87 ^{Bb}
	3	67.38±0.61 ^{Aa}	66.26±1.03 ^{Aa}	63.85±0.61 ^{Ab}	61.17±0.38 ^{Ac}
	6	63.78±0.38 ^{Aa}	65.44±1.30 ^{Aa}	64.22±1.66 ^{Aa}	60.18±0.94 ^{Ab}
	9	56.16±2.16 ^{Ba}	55.07±0.29 ^{Ba}	53.85±1.66 ^{Bab}	51.16±1.25 ^{Bcb}
	12	48.35±0.34 ^{Cbc}	51.57±0.75 ^{Cab}	47.99±3.33 ^{Cc}	52.34±1.01 ^{Ba}
	15	48.17±0.96 ^{Cab}	49.50±1.59 ^{Cab}	47.11±1.10 ^{CDB}	50.28±1.42 ^{Ca}
	18	41.35±2.22 ^{DEb}	45.38±2.64 ^{DEa}	44.35±1.10 ^{DEFab}	45.66±0.61 ^{Ea}
贮藏	21	39.83±1.59 ^{Fc}	44.88±1.78 ^{DEab}	46.16±1.30 ^{CDEa}	43.01±1.65 ^{FCb}
	24	44.62±3.34 ^{CDb}	45.04±0.11 ^{DEb}	44.97±0.58 ^{DEFb}	47.56±0.91 ^{Da}
	10	41.36±1.46 ^{DEb}	46.93±0.95 ^{Da}	44.64±1.46 ^{DEFa}	44.86±1.25 ^{Efa}
	20	41.52±2.48 ^{DEb}	45.52±0.67 ^{DEa}	43.89±1.86 ^{EFab}	42.77±0.77 ^{Gab}
	30	41.63±2.68 ^{DEa}	43.12±0.92 ^{Ea}	42.92±1.08 ^{Fa}	43.75±0.80 ^{FCa}

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)；同列不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)；表3、4同。

a*值可以反映出肉中色素的氧化变化情况。如表3所示，加工过程中，各组香肠的a*值整体呈先上升后下

降趋势。其原因如下：一方面，0~3 d除PC组外，NC、R0.5和R1组样品中亚硝酸盐含量逐渐升高（图3），亚硝酸盐分解产生NO，NO与肌红蛋白结合形成亚硝基肌红蛋白，使肉制品呈现稳定的红色^[32]；另一方面，香肠在发酵过程中不断脱水，使色素浓度相应增大。加工后期和贮藏过程中，脂肪氧化形成的羰基可以与肌肉蛋白褐色色素中的自由基发生反应，加速褐色物质的形成，进而造成香肠a*值下降^[33]。4组样品中，PC组的a*值在整个加工和贮藏过程中均显著高于R1组 ($P < 0.05$)，在加工9~15 d和贮藏10~20 d显著高于R0.5组，在加工9~18 d显著高于NC组 ($P < 0.05$)；R0.5组从加工9 d直至贮藏20 d均显著高于R1组 ($P < 0.05$)，但与NC组在加工和贮藏的大部分时间均无显著差异 ($P > 0.05$)。各组香肠的a*值大小顺序与各组香肠TBARS值（图4）大小顺序相反，间接印证了上述推论。姜蕾等^[31]在添加较高浓度的迷迭香提取物至萨拉米香肠时也得到相似结果，他们认为迷迭香提取物会与活性氧结合，降低了氧合肌红蛋白的产生，导致香肠的a*值下降。此外，萝卜粉所带的棕褐色色素也会对香肠红色有掩盖作用，使样品的a*值下降。

表3 香肠在加工和贮藏期间a*的变化

Table 3 Changes in a* of dry fermented sausage during processing and storage

时期	时间/d	NC组	PC组	R0.5组	R1组
加工	0	9.37±1.60 ^{BCab}	9.79±0.30 ^{CDa}	8.08±0.99 ^{FGab}	7.58±0.17 ^{Cb}
	3	8.00±1.41 ^{CDab}	9.47±0.31 ^{Da}	8.08±0.52 ^{FGab}	7.81±0.40 ^{Cb}
	6	9.69±0.50 ^{BCab}	10.32±0.16 ^{Ca}	8.73±1.64 ^{EFab}	8.40±0.54 ^{BCb}
	9	9.52±0.50 ^{BCc}	11.64±0.34 ^{Ba}	10.72±0.66 ^{ABCb}	9.34±0.14 ^{Ac}
	12	11.51±0.17 ^{Ab}	13.24±0.58 ^{Aa}	11.45±0.26 ^{Ab}	9.23±0.33 ^{Ac}
	15	10.63±0.11 ^{ABb}	12.20±0.64 ^{Ba}	10.97±0.64 ^{ABb}	9.36±0.45 ^{Ac}
	18	10.82±0.87 ^{ABb}	12.15±0.28 ^{Ba}	11.21±0.65 ^{ABab}	8.66±0.64 ^{ABc}
贮藏	21	11.07±0.46 ^{ABa}	11.49±0.68 ^{Ba}	10.14±0.33 ^{ABCDB}	8.22±0.37 ^{BCc}
	24	9.50±1.16 ^{BCa}	9.57±0.25 ^{CDa}	8.93±0.09 ^{DEFa}	7.77±0.13 ^{Cb}
	10	11.97±0.23 ^{Aa}	11.39±0.41 ^{Ba}	10.10±0.43 ^{BBCDB}	7.75±0.62 ^{Cc}
	20	9.61±1.28 ^{gBCb}	11.45±0.38 ^{Ba}	9.65±0.32 ^{CDEb}	8.10±0.64 ^{BCc}
	30	7.60±1.17 ^{Dab}	8.43±0.71 ^{Ea}	7.41±0.43 ^{Gab}	6.33±0.07 ^{Db}

如表4所示，发酵成熟前期，各组香肠的b*值大体上呈下降趋势；0~9 d，可能由于水分的流失以及色素的形成，各组样品的b*值变化较大；加工18 d至贮藏期结束，各组香肠的b*值变化不大趋于平稳。4组样品中，R0.5组的b*值在加工过程中较高，R1组的b*值在加工3~6 d显著高于NC组和PC组 ($P < 0.05$)。R0.5组的b*值在加工过程中总体高于NC组，可能是由于这组香肠的水分含量高于NC组的缘故。另一方面，由于添加的萝卜粉对香肠具有促氧化作用，可以使肉中肌红蛋白氧化成高铁肌红蛋白，导致b*值下降^[34]。

表4 香肠在加工和贮藏期间 b^* 的变化
Table 4 Changes in b^* value of dry fermented sausage during processing and storage

时期	时间/d	NC组	PC组	R0.5组	R1组
加工	0	13.20±1.54 ^{Aa}	13.99±0.39 ^{Aa}	14.26±1.03 ^{Aa}	13.48±0.50 ^{Aa}
	3	10.08±0.68 ^{Bb}	10.97±0.50 ^{Bb}	10.74±0.39 ^{Bb}	12.22±0.33 ^{Ba}
	6	9.29±0.22 ^{BCc}	9.70±0.26 ^{CDc}	11.45±0.49 ^{Ba}	10.21±0.65 ^{Cb}
	9	8.40±0.31 ^{CD^Eb}	9.38±0.72 ^{2b}	10.91±0.16 ^{Ba}	9.65±1.25 ^{CD^{ab}}
	12	8.19±0.57 ^{CD^Eb}	10.64±0.53 ^{Ba}	8.98±0.60 ^{CD^b}	9.28±0.67 ^{CD^b}
	15	8.77±0.64 ^{BC^Da}	8.74±0.69 ^{DE^a}	9.20±0.49 ^{Ca}	9.17±0.17 ^{CD^Ea}
	18	6.65±0.76 ^{Cc}	7.90±0.14 ^{EF^{ab}}	8.48±0.31 ^{CD^Ea}	7.05±0.84 ^{Cb}
贮藏	21	8.04±0.90 ^{CD^EGa}	7.54±0.67 ^{Fa}	8.18±0.31 ^{DE^Fa}	6.98±0.53 ^{Ga}
	24	7.76±0.51 ^{BD^EGa}	6.91±0.66 ^{Fb}	7.92±0.13 ^{EF^a}	8.59±0.30 ^{DE^Fa}
	10	9.45±0.52 ^{Ca}	7.83±0.39 ^{EF^{bc}}	8.89±0.97 ^{CD^Eab}	7.49±0.69 ^{FG^c}
	20	6.75±1.04 ^{FG^b}	8.78±1.16 ^{DE^a}	8.10±0.33 ^{DE^Fab}	7.38±0.54 ^{G^{ab}}
	30	7.20±1.03 ^{EF^Ga}	6.91±0.70 ^{Fa}	7.77±0.07 ^{Fa}	8.08±0.44 ^{EF^Ga}

2.5 加工和贮藏期间TBARS值的变化

TBARS值是反映脂肪氧化程度的重要指标，代表以不饱和脂肪酸的氧化产物丙二醛为主的次级氧化产物的含量，其数值越大，说明脂肪氧化程度越高，可作为衡量肉制品贮存期品质优劣的指标^[35]。通常，TBARS值在0.5~2 mg/kg的范围内，普遍感受不到异味，但是当时间延长，TBARS值继续增大，就会出现不良的酸败味道^[7]。

如图4所示，加工过程中，4组香肠的TBARS值整体随加工时间的延长先增加后下降再趋于平稳状态；贮藏阶段，各组香肠脂肪氧化程度都大幅增加，添加萝卜粉的香肠的脂肪氧化程度均高于对照组，但仍处在较低水平。可能是因为发酵前期(0~10 d)香肠中还留有一些氧气，在合适的温度下，使脂肪发生氧化，TBARS值逐渐升高，由此产生的丙二醛又与肉类中的氨基相互作用生成1-氨基-3-氨基丙烯，导致TBARS值下降^[36]。PC组在加工和贮藏过程中的TBARS值整体低于其他3组，这可能是由于添加亚硝酸盐所起到的抗氧化作用。R0.5组的TBARS值在加工和贮藏过程中的大部分时间均与NC组无显著差异($P>0.05$)，而R1组的TBARS值则在整个加工和贮藏过程中均高于R0.5组和NC组，说明1%萝卜粉的添加促进了脂肪氧化。据文献报道，萝卜中含有VC、硫素等抗氧化物质，具有较强的抗氧化活性^[37]。但本实验结果表明，1%萝卜粉的添加对香肠中的脂肪没有抗氧化作用，反而促进了脂肪的氧化。其可能的原因如下：1) 萝卜粉自身较低的pH值加速了香肠中脂肪氧化；2) 白萝卜中含有丰富的镁、铁、锌等金属元素^[38]，促进了香肠中脂肪的氧化。

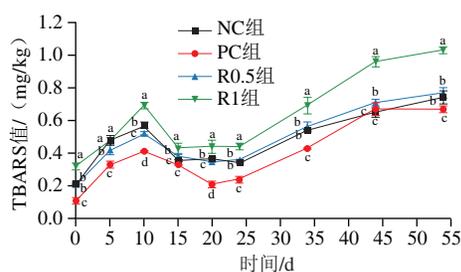


图4 香肠在加工和贮藏期间TBARS值的变化

Fig. 4 Changes in TBARS value of dry fermented sausages during processing and storage

2.6 加工和贮藏期间TVB-N值的变化

如图5所示，NC组和PC组的TVB-N值在整个加工和贮藏过程中均逐渐增加；而R0.5组和R1组的TVB-N值在加工过程中先增加后减少，在贮藏期则逐渐增加。加工前期(0~15 d)，由于细菌与酶的作用，使含氮的大分子分解产生碱性含氮化合物，同时这些物质能与腐败时分解形成的有机酸相结合，形成盐基氮，聚集在肉类产品中，使其TVB-N值增加。加工后期，发酵菌开始衰亡，由于各组添加物的抑菌作用不同，发酵菌利用含氮大分子产生碱性化合物的程度也不同，同时产生的碱性化合物部分与酸性物质中和，导致产品TVB-N值发生波动^[29]。阴性对照组没有抑菌作用，阳性对照组抑菌作用较弱，因此，发酵后期，发酵菌还在持续产生碱性化合物，使TVB-N值逐渐增加；而添加了萝卜粉的香肠有较强的抑菌作用，抑制了碱性化合物的产生，添加量越大，抑制作用越强，从而导致TVB-N值下降。但添加0.5%萝卜粉的香肠却在贮藏中后期比空白对照香肠具有更高的TVB-N值，其原因可能是由于TVB-N值是在不同贮藏时间取不同的香肠进行测定，此过程可能存在取样产生的误差，导致不同组别样品的TVB-N值存在较大差异。具体原因还有待进一步研究。

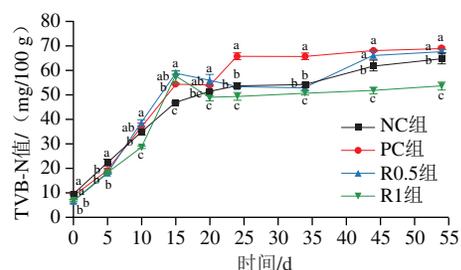


图5 香肠在加工和贮藏期间TVB-N值的变化

Fig. 5 Changes in TVB-N value of dry fermented sausage during processing and storage

2.7 加工和贮藏过程中菌落总数和乳酸菌数变化

菌落总数可以用来判定肉制品被细菌污染的程度^[39]。如图6A所示，发酵成熟过程中，各组发酵香肠菌落总数呈先增加后降低趋势，这可能是由于香肠中添加了外源乳酸菌发酵剂，在加工前期(0~10 d)肉中水

分活度较大,且香肠原料肉中含有丰富的营养物质,为微生物提供了较好的生长环境,从而使香肠中微生物数量迅速增加。加工后期至贮藏期结束,菌落总数整体呈下降趋势,可能是耗氧微生物耗尽香肠内的氧气,使香肠内部转变为厌氧环境,同时由于香肠含水量降低,营养物质被消耗,盐浓度不断上升,且香肠内部为酸性环境,抑制了大部分微生物的生长繁殖,使其数量缓慢下降。4组样品中,除0、5 d外R1组的菌落总数显著低于其他组 ($P < 0.05$); R0.5组在加工10 d后一直于贮藏15 d均显著低于NC组 ($P < 0.05$),但在加工和贮藏过程中大部分时间与PC组无显著差异 ($P > 0.05$)。这表明两种添加量的萝卜粉对发酵干香肠均有一定的抑菌效果,R1组比R0.5的抑菌效果更显著。萝卜粉在发酵香肠中具有抑菌作用的原因可能是由于:1)萝卜粉自身较低的pH值;2)萝卜中含有如硫素等的抑菌物质^[40]。

由于香肠内部的低氧环境、丰富的营养物质以及pH值都比较适宜乳酸菌生长繁殖。乳酸菌发酵产酸,同时对单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、蜡样芽孢杆菌以及部分真菌具有抑菌活性,从而使乳酸菌能在发酵阶段迅速生长繁殖并成为发酵香肠加工中的优势菌^[41]。如图6B所示,4组香肠的乳酸菌数变化与菌落总数变化基本一致,这也说明了乳酸菌是香肠发酵过程中的优势菌群。0 d时,各组乳酸菌数均在6.20~6.40 (lg (CFU/g))之间。10 d后,可能是由于蛋白质和脂质氧化形成的产物大量积累,不利于乳酸菌存活,导致乳酸菌数量开始下降。

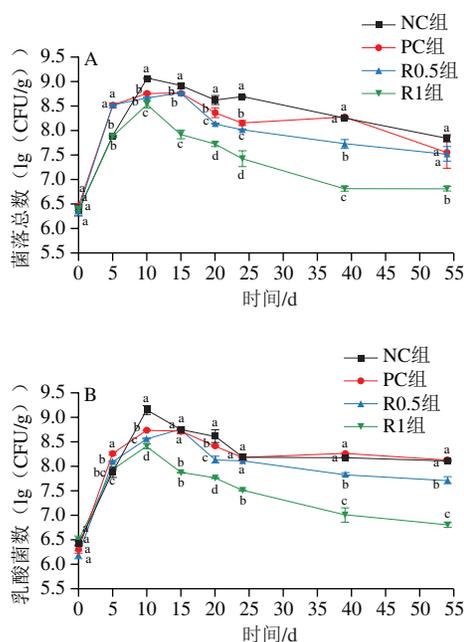


图6 香肠在加工和贮藏期间菌落总数(A)和乳酸菌数(B)的变化
Fig. 6 Changes in total bacterial count (A) and lactic acid bacteria count (B) in dry fermented sausages during processing and storage

2.8 感官评价结果分析

由表5可知,添加萝卜粉对发酵香肠的感官性质有一定影响。R0.5组和R1组的外观与NC组无差异 ($P > 0.05$),但显著优于PC组 ($P < 0.05$),添加一定量白萝卜粉使得香肠更饱满并富有弹性,使其外观优于添加亚硝酸盐组。在组织状态和风味方面,4组香肠之间差异不显著 ($P > 0.05$)。由于添加的萝卜粉在干燥过程中发生褐变,使得R1组色泽较深,得分显著低于其他3组 ($P < 0.05$)。R0.5组色泽与NC和PC组无显著差异 ($P > 0.05$)。

表5 发酵干香肠感官评价结果
Table 5 Results of sensory evaluation of dry fermented sausages

样品	NC组	PC组	R0.5组	R1组
外观	18.70±2.21 ^{ab}	17.10±2.73 ^b	19.30±1.25 ^a	20.40±1.90 ^a
组织状态	20.10±3.07 ^a	18.90±2.13 ^a	17.70±3.06 ^a	17.00±5.08 ^a
色泽	20.50±2.22 ^a	19.80±1.99 ^a	17.90±2.56 ^a	14.10±4.41 ^b
风味	15.10±4.31 ^a	13.60±4.84 ^a	13.00±2.87 ^a	14.70±3.53 ^a

注:同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$),表6同。

2.9 发酵香肠的质构分析

由表6可知,PC组的硬度最高,与其余3组差异显著 ($P < 0.05$);R0.5组的硬度显著低于R1组 ($P < 0.05$),但与NC组无显著差异 ($P > 0.05$)。因此,亚硝酸盐可显著改善肉的品质,使发酵香肠的组织结构更为紧密。R1组弹性显著高于其余3组 ($P < 0.05$),可能是萝卜粉中含有的膳食纤维提升了香肠的弹性;R0.5组弹性与NC组和PC组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。R0.5组的内聚性与其他组无显著差异 ($P > 0.05$),但R1组显著低于NC组 ($P < 0.05$)。R0.5组和R1组香肠咀嚼性显著高于NC组 ($P < 0.05$),但显著低于PC组 ($P < 0.05$);其中R0.5组显著低于R1组 ($P < 0.05$)。

表6 发酵干香肠的质构性质
Table 6 Texture properties of dry fermented sausages

样品	NC组	PC组	R0.5组	R1组
硬度/gf	10 239.50±305.52 ^c	13 923.50±824.64 ^a	10 186.00±339.80 ^c	11 747.50±229.29 ^b
弹性	0.73±0.01 ^b	0.72±0.03 ^b	0.72±0.03 ^b	0.77±0.02 ^a
内聚性	0.67±0.01 ^a	0.63±0.02 ^b	0.64±0.03 ^{ab}	0.60±0.03 ^b
咀嚼性/gf	3 752.87±180.16 ^d	6 063.76±384.64 ^a	4 510.11±280.94 ^c	5 466.41±288.95 ^b

3 结论

将硝酸盐含量为(15 725.20±190.86) mg/kg的白萝卜粉以0.5%、1%的添加量加入猪肉发酵干香肠中,结果表明添加萝卜粉能明显降低发酵干香肠在加工过程中的pH值,能够加速香肠水分的散失和抑制蛋白质的分解,有一定的抑菌作用,但抗氧化能力弱于亚硝酸盐。添加萝卜粉替代亚硝酸盐降低了香肠的硬度与咀嚼性,提升了香肠的外观,保持或改善了香肠的弹性,但对香

肠内聚性、组织状态和风味影响不大。综合来看,添加0.5%萝卜粉的香肠在亚硝酸盐含量、 a^* 、TBARS值以及感官品质方面优于添加1%萝卜粉的香肠。因此,发酵香肠中添加0.5%萝卜粉是一种较好的替代合成亚硝酸盐策略。

参考文献:

- [1] 孟少华,薛向阳,傅琳秋,等.发酵香肠及其产品开发的研究现状[J].肉类工业,2006(2):18-20.
- [2] 张静,王淑培,李炎芳,等.低亚硝酸盐型中式发酵香肠的研制[J].食品研究与开发,2021,42(20):92-99. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.20.014.
- [3] FLORES M, TOLDRÁ F. Chemistry, safety, and regulatory considerations in the use of nitrite and nitrate from natural origin in meat products[J]. Meat Science, 2021, 171: 108272. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108272.
- [4] BOUVARD V, LOOMIS D, GUYTON K Z, et al. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat[J]. The Lancet Oncology, 2015, 16(16): 1599-1600. DOI:10.1016/S1470-2045(15)00444-1.
- [5] POSTHUMA J A, RASMUSSEN F D, SULLIVAN G A. Effects of nitrite source, reducing compounds, and holding time on cured color development in a cured meat model system[J]. Food Science and Technology, 2018, 95: 47-50. DOI:10.1016/j.lwt.2018.04.040.
- [6] 郇延军,赵亚娟,赵杰.芹菜粉对天然中式香肠颜色影响及工艺优化的研究[J].食品工业科技,2012,33(12):294-298. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.12.077.
- [7] PENNISI L, VERROCCHI E, PALUDI D, et al. Effects of vegetable powders as nitrite alternative in Italian dry fermented sausage[J]. Italian Journal of Food Safety, 2020, 9(2): 132-136. DOI:10.4081/ijfs.2020.8422.
- [8] 伍勇,刘松青,徐坤,等.发酵蔬菜粉的添加对川味香肠品质的影响[J].中国调味品,2021,46(12):35-41. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2021.12.007.
- [9] KIM T K, KIM Y B, JEON K H, et al. Effect of fermented spinach as sources of pre-converted nitrite on color development of cured pork loin[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2017, 37(1): 105-113. DOI:10.5851/kosfa.2017.37.1.105.
- [10] 樊晓盼,王思雨,李沛然,等.添加发酵菠菜液对猪肉灌肠冷藏过程中品质的影响[J].肉类研究,2015,29(3):15-19. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201503004.
- [11] SUCU C, TURP G Y. The investigation of the use of beetroot powder in Turkish fermented beef sausage (sucuk) as nitrite alternative[J]. Meat Science, 2018, 140: 158-166. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.03.012.
- [12] MARISTELA M O, PAULO E, RICKYN A, et al. Beetroot and radish powders as natural nitrite source for fermented dry sausages[J]. Meat Science, 2021, 171: 108275. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108275.
- [13] BAHADORAN Z, MIRMIRAN P, JEDDI S, et al. Nitrate and nitrite content of vegetables, fruits, grains, legumes, dairy products, meats and processed meats[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 51: 93-105. DOI:10.1016/j.jfca.2016.06.006.
- [14] 王凯丽,李秀明,王洋,等.复合果蔬取代部分硝酸盐对降低发酵香肠中亚硝酸盐的作用[J].食品科学,2018,39(12):60-66. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201812010.
- [15] 国家卫生和计划生育委员会.食品中水分的测定:GB 5009.3—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:1-4.
- [16] 黄业传,王洋,彭春雷.玫瑰花提取液对发酵香肠品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(3):205-211. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028572.
- [17] CHEN X, LI J P, ZHOU T, et al. Two efficient nitrite-reducing *Lactobacillus* strains isolated from traditional fermented pork (Nanx Wudl) as competitive starter cultures for Chinese fermented dry sausage[J]. Meat Science, 2016, 121: 302-309. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.06.007.
- [18] 倪思思.等离子体活化水在中式香肠中的应用[D].杭州:浙江大学,2021:29-30.
- [19] 国家卫生和计划生育委员会.食品中挥发性盐基氮的测定:GB 5009.228—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:3-5.
- [20] 国家食品药品监督管理总局,国家卫生和计划生育委员会.食品微生物学检验 菌落总数测定:GB 4789.2—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:1-4.
- [21] 国家食品药品监督管理总局,国家卫生和计划生育委员会.食品微生物学检验 乳酸菌检验:GB 4789.35—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:1-6.
- [22] 肖亚庆.戊糖乳杆菌降N-亚硝胺及其在香肠发酵中的应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2018:26-27.
- [23] 刘玥.木糖葡萄糖菌干粉保护剂的研究及其在发酵香肠中的应用[D].扬州:扬州大学,2020:45-46.
- [24] YEONG J O, DONG S J. Evaluation of probiotic properties of *Lactobacillus* and *Pediococcus* strains isolated from *Omegisool*, a traditionally fermented millet alcoholic beverage in Korea[J]. Food Science and Technology, 2016, 121: 302-309. DOI:10.1016/j.lwt.2015.03.005.
- [25] 田甜,张雅琳,潘攀,等.微生物复合发酵剂对香肠的食用安全性分析[J].食品工业,2020,41(6):329-333.
- [26] XIAO Y Q. Effect of inoculating *Lactobacillus pentosus* R3 on N-nitrosamines and bacterial communities in dry fermented sausages[J]. Food Control, 2018, 87: 126-134. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.12.025.
- [27] 朱紫玉,俞龙浩,陈洪生,等.东北酸菜粉对乳化香肠贮藏期品质变化的影响[J].中国食品添加剂,2021,32(8):58-66. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2021.08.009.
- [28] 杜智慧.不同发酵剂对发酵香肠品质影响的研究[D].晋中:山西农业大学,2014:5-8.
- [29] TOMOVI V, SOJIC B, SAVANOVIC J, et al. New formulation towards healthier meat products: *Juniperus communis* L. essential oil as alternative for sodium nitrite in dry fermented sausages[J]. Foods, 2020, 9(8): 1066-1083. DOI:10.3390/foods9081066.
- [30] 陈景鑫.添加亚麻籽粉和番茄粉对鸡肉香肠品质特性的影响[J].肉类研究,2020,34(8):35-40. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200106-002.
- [31] 姜蕾,范尚宇,张万刚,等.迷迭香提取物对萨拉米品质的影响[J].肉类工业,2017(6):22-29.
- [32] 田文广,张俊杰,石亚萍,等.发酵肉制品的研究进展[J].肉类工业,2022(2):54-57.
- [33] HAMRE K, LIE O, SANDNES K. Development of lipid oxidation and flesh colour in frozen stored fillets of Norwegian spring-spawning herring (*Clupea harengus* L.). Effects of treatment with ascorbic acid[J]. Food Chemistry, 2003, 82(3): 447-453. DOI:10.1016/S0308-8146(03)00070-0.
- [34] ESMER O K, IRKIN R, DEGIRMENCIOGLU N, et al. The effects of modified atmosphere gas composition on microbiological criteria, color and oxidation values of minced beef meat[J]. Meat Science, 2011, 88(2): 221-226. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.12.021.
- [35] 徐海菊,周兵.肉及肉制品氧化控制方法研究进展[J].保鲜与加工,2022,22(3):111-120. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2022.03.017.
- [36] 任双,叶浪,乔晓玲,等.天然抗氧化剂替代部分亚硝酸钠对乳化肠护色及抗氧化效果的影响[J].肉类研究,2018,32(1):9-15. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201801002.
- [37] 宋力,孙玉聪,王延芳,等.微波法提取萝卜中抗氧化物质的工艺及多酚含量的测定[J].化学世界,2016,57(4):221-225. DOI:10.19500/j.cnki.0367-6358.2016.04.008.
- [38] 马川兰.发酵白萝卜制品的研究进展[J].现代食品,2021(16):77-78;84. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2021.16.021.
- [39] 柴子惠,李洪军,李少博,等.低盐腊肉贮藏期间菌相和理化性质的变化[J].食品科学,2019,40(11):201-206. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180615-309.
- [40] 周政子.萝卜籽中硫代葡萄糖苷的提取纯化及其降解产物的抑菌特性研究[D].杭州:浙江工商大学,2013:13-26.
- [41] 段君雅,刘傲兵,吕蒙,等.功能性发酵剂在发酵香肠中的应用研究进展[J].食品工业科技,2022,43(3):456-462. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021030059.