

茶红素替代亚硝酸钠对中式香肠贮藏品质及挥发性风味物质的影响

黄其程, 郭敬岩, 张 晋, 李欢欢, 赵 珂, 许 腾, 苏铭伟, 唐宏刚

Effects of Substituting Sodium Nitrite with Thearubigins on Storage Quality and Volatile Flavor Compounds of Chinese Sausage

HUANG Qicheng, GUO Jingyan, ZHANG Jin, LI Huanhuan, ZHAO Ke, XU Teng, SU Mingwei, and TANG Honggang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080374>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

食用菌对鸭肉乳化肠冷藏过程中理化品质与安全特性的影响

Effects of Edible Mushrooms on Physicochemical Properties and Safety of Emulsified Duck Intestines during Storage

食品工业科技. 2021, 42(22): 329-335 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040073>

贮藏温度对大球盖菇采后品质和挥发性风味成分影响

Effects of Storage Temperature on the Postharvest Quality and Volatile Flavor Components of *Stropharia rugoso-annulata*

食品工业科技. 2023, 44(11): 369-378 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070297>

复配发酵剂对发酵香肠的品质及挥发性风味的影响

Effects of Mixed Starter Culture on Quality and Volatile Flavor of Fermented Sausages

食品工业科技. 2024, 45(5): 126-133 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040273>

类球红细菌粗提物对贮藏期香肠挥发性风味物质和呈味氨基酸的影响

Effects of *Rhodobacter sphaeroides* Crude Extracts on Volatile Flavor Substances and Flavor Amino Acids of Sausages During Storage

食品工业科技. 2023, 44(12): 353-362 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090096>

等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质影响

Effect of Plasma Activated Water on Microbial Decontamination and Storage Quality of Fresh-cut Lettuce

食品工业科技. 2020, 41(21): 281-285,292 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120106>

外源褪黑素处理对金丝绞瓜贮藏品质和抗氧化能力的影响

Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Storage Quality and Antioxidant Capacity of Spaghetti Squash

食品工业科技. 2024, 45(12): 294-301 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070220>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄其程, 郭敬岩, 张晋, 等. 茶红素替代亚硝酸钠对中式香肠贮藏品质及挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 321–328. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080374

HUANG Qicheng, GUO Jingyan, ZHANG Jin, et al. Effects of Substituting Sodium Nitrite with Thearubigins on Storage Quality and Volatile Flavor Compounds of Chinese Sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 321–328. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080374

· 贮运保鲜 ·

茶红素替代亚硝酸钠对中式香肠贮藏品质及挥发性风味物质的影响

黄其程^{1,2}, 郭敬岩³, 张晋^{1,2}, 李欢欢^{1,2}, 赵珂^{1,2}, 许腾^{1,2}, 苏铭伟⁴, 唐宏刚^{1,2,*}

(1. 全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 浙江杭州 310021;

2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江杭州 310021;

3. 云南农业大学, 云南昆明 650500;

4. 浙江正德和食品有限公司, 浙江丽水 323406)

摘要: 采用茶红素替代亚硝酸钠制备中式香肠, 通过测定贮藏期间香肠的色度值、水分活度值、pH、酸价、硫代巴比妥酸反应物值、挥发性盐基氮、感官评分以及挥发性风味物质的变化, 探究茶红素替代亚硝酸钠对中式香肠贮藏品质和风味的影响。结果表明, 与亚硝酸钠对照组相比, 以 200 mg/kg 茶红素替代 50% 亚硝酸钠在呈色效果 (a^* 值) 和感官评分方面无显著差异 ($P>0.05$), 脂肪氧化和蛋白质降解程度均维持在较低水平, GC-IMS 差异图显示挥发性风味物质组成最为接近。该研究表明, 茶红素部分替代亚硝酸钠可使中式香肠在贮藏期间保持较好的品质, 有效降低亚硝酸盐的添加量, 茶红素在肉制品加工过程中具有一定的应用前景。

关键词: 茶红素, 亚硝酸钠, 中式香肠, 贮藏, 品质, 风味物质

中图分类号: TS251.6⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0321-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080374

本文网刊:



Effects of Substituting Sodium Nitrite with Thearubigins on Storage Quality and Volatile Flavor Compounds of Chinese Sausage

HUANG Qicheng^{1,2}, GUO Jingyan³, ZHANG Jin^{1,2}, LI Huanhuan^{1,2}, ZHAO Ke^{1,2}, XU Teng^{1,2}, SU Mingwei⁴, TANG Honggang^{1,2,*}

(1. Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Food Logistic and Processing, Hangzhou 310021, China;

2. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China;

3. Yunnan Agricultural University, Kunming 650500, China;

4. Songyang County Zhengdehe Food Co., Ltd., Lishui 323406, China)

Abstract: In this study, Chinese sausage was prepared by replacing sodium nitrite with thearubigins. To evaluate the effects of the substitution of sodium nitrite on the storage quality and flavor of Chinese sausage, the changes in chromatic value, water activity, pH, acid value, thiobarbituric acid reactive substances value, volatile base nitrogen, sensory score, and volatile flavor compounds during storage were measured. The results showed that compared with the control group of sodium nitrite, there was no significant difference ($P>0.05$) in the coloring effect (a^* value) and sensory scores when 50% of sodium nitrite was replaced by 200 mg/kg thearubigins. The degree of lipid oxidation and protein degradation maintained at a lower level. GC-IMS difference map showed that volatile flavor components were closest. The study indicated that the partial substitution of sodium nitrite with thearubigins could maintain good quality of Chinese sausages during storage, and

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目 (2022C02060); 国家蛋鸡产业技术体系 (CARS-40-K26)。

作者简介: 黄其程 (1996-), 女, 硕士, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: 17857006016@163.com。

* 通信作者: 唐宏刚 (1980-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: zaastang@163.com。

reduce the amount of nitrite addition effectively. The thearubigins showed certain application prospects in the processing of meat products.

Key words: thearubigins; sodium nitrite; Chinese sausage; storage; quality; flavor compounds

中式香肠是中国传统肉制品,因色泽诱人,富含脂肪、蛋白质及其他营养元素而受到消费者的喜爱。然而,也因为高含量的脂肪和蛋白质,中式香肠在加工、运输和贮藏过程中产品容易变质,其中,脂质和蛋白质的氧化以及肉类腐败细菌是影响其保质期的主要原因^[1]。亚硝酸盐是常用的一种食品添加剂,在中式香肠、腊肉、火腿等肉制品加工过程中有广泛的应用。亚硝酸盐经还原反应产生的NO可与肌红蛋白结合生成亚硝基肌红蛋白,能够为肉制品提供稳定且良好的色泽^[2],并能够抑制病原菌和腐败菌的生长。然而,亚硝酸盐摄入后在酸性条件下会和人体内生物胺结合生成亚硝酰胺,具有生物毒性和致癌性^[3]。因此,有必要通过天然有效成分的部分替代以减少亚硝酸盐添加量,在保证中式香肠品质的同时提高其安全性。

茶红素是茶叶中多酚类物质在发酵过程中经氧化聚合反应形成的产物,含量约占红茶干重的9%~19%^[4],作为一种天然的多酚类色素,颜色呈现红褐色,对红茶的呈色呈味有重要影响^[5]。研究表明,茶红素是分子量差异较大的异源物质,相对分子质量为700~40000甚至更大^[6],由低分子量多酚如表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)和表儿茶素(EC)经酶促氧化形成^[7]。茶红素相关药理研究结果表明,其在抗氧化、抗突变、抗癌、抗致畸性、改善消化系统功能等方面有较好的生物活性。茶红素的抗氧化机制主要表现在抑制自由基的产生、清除自由基和螯合过渡金属离子^[8]。YANG等^[9]通过体外模拟实验发现,茶红素具有较强的DPPH·和OH·清除能力,能激活过氧化氢酶,使得H₂O₂分解成H₂O和O₂,从而抑制H₂O₂和O₂在铁离子催化下生成OH·。NAM等^[10]从发酵茶中提取茶红素,在80 μg/mL浓度下,自由基(·OH)清除率高达79.7%。茶红素提升消化系统功能主要表现在改善肠道微生物环境,维持生理平衡。MAITY等^[11]给结肠炎模型小鼠每日摄入茶红素,研究发现在40 mg/kg剂量下,茶红素能够清除病原物质并减少肠道结构损伤,从而改善腹泻及结肠炎症疾病。茶红素作为天然色素可以起到改善肉制品颜色的作用,其抗氧化特性对延缓肉制品中脂肪氧化和蛋白质降解有积极影响,并且能够缓解部分消化系统疾病。目前,茶多酚在发酵肉制品中的应用已有较深入的研究,而有关茶红素的研究主要集中在生物学活性方面,在肉制品加工领域的应用未见报道。

本文以茶红素替代亚硝酸钠制备中式香肠,探究茶红素添加量对香肠贮藏期间脂肪氧化、蛋白降解、挥发性风味物质组成等品质指标的影响,研究结果可为拓展茶叶功能性成分在传统肉制品加工中的

应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪后腿肉、食盐、白砂糖、白酒、胶原蛋白肠衣 杭州市德胜农贸市场;亚硝酸钠 四川金山制药有限公司;茶红素 湖北三鑫生物科技有限公司;其他分析试剂 国药集团化学试剂有限公司;丙二醛(MDA)含量检测试剂盒 南京建成生物工程研究所。

S20-LA511 碎肉机 九阳股份有限公司;NH310 高精度分光测色仪 深圳市三恩驰科技有限公司;HD-4 水分活度计 无锡市华科仪器仪表有限公司;Testo205 pH测定仪 德图仪器中国有限公司;SPECTRA MAX 190 酶标仪 美谷分子仪器(上海)有限公司;DH18R 离心机 德国 Eppendorf AG 公司;Flavour Spec®风味分析仪 山东海能科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 中式香肠的制备 将猪后腿肉按肥瘦比3:7混合,经碎肉机混合均匀,每1000 g混合肉馅中加入食盐25 g,白砂糖70 g,蒸馏水70 g,白酒30 g。在前期试验的基础上,添加不同的亚硝酸钠和茶红素组合,具体分组为:N120组(对照组)添加120 mg亚硝酸钠;TR400组添加400 mg茶红素;TR300+N30组添加300 mg茶红素和30 mg亚硝酸钠;TR200+N60组添加200 mg茶红素和60 mg亚硝酸钠;TR100+N90组添加100 mg茶红素和90 mg亚硝酸钠。将肉糜和配料混合均匀后灌入胶原蛋白肠衣,置于60℃烘箱中烘制7 h,再转入15℃培养箱保存14 d。在贮藏期的第0、3、7和14 d进行取样,测定香肠的色度、水分活度(A_w)、pH、酸价、硫代巴比妥酸反应物(TBARS)值、挥发性盐基氮(TVB-N)值,并于贮藏期结束后(14 d)取样,测定样品的感官品质与挥发性风味物质组成。

1.2.2 理化指标测定 色度测定:将香肠样品分割成片状,采用高精度分光测色仪测定香肠截面色度值。测定前使用白板校正,每组样品重复测定3次。水分活度(A_w)测定^[12]:取10 g香肠样品,剪切均匀,采用水分活度计测定香肠水分活度(A_w),每组样品重复测定3次。pH测定^[12]:采用带穿刺探头和温度补偿探头的pH测定仪测定香肠内部pH,校正温度25℃下,每组样品重复测定3次。

1.2.3 脂肪与蛋白氧化测定 酸价测定:参考朱培培^[13]的方法,取10 g香肠样品剪碎,加入100 mL蒸馏水,在4000 r/min下离心10 min后过滤,取50 mL

表 1 感官评价评分标准
Table 1 Scoring criteria of sensory evaluation

指标	8~10分	5~7分	1~4分
外观	肠衣完整, 紧包肉馅, 肠体饱满, 无斑点	肠衣较完整, 肠体饱满	肠衣易分离, 包裹肉馅较松散, 表面有斑点
组织状态	切片紧实, 肉质细腻	切片完整, 肉质均匀	切片不完整, 肉质松散
色泽	呈现鲜红色, 发色均匀	呈红色, 发色较均匀	呈暗色, 发色不均匀
气味	肉香味浓郁	肉香味一般, 但无脂肪酸败味	无肉香味, 有脂肪酸败味
口感	肉质嫩, 有韧性和嚼劲	肉质一般, 有一定的韧性	肉质较差, 无咀嚼感

滤液用酸碱滴定法测定酸价值。脂肪过氧化程度测定: 采用丙二醛(MDA)含量检测试剂盒测定香肠样品的 TBARS 值。挥发性盐基氮: 参照 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》^[14] 中的微量扩散法测定香肠样品中挥发性盐基氮含量以表征蛋白降解程度。

1.2.4 感官评价 邀请 8 位身体健康的食品专业人员(4 名男性和 4 名女性, 年龄 20~30 岁), 在感官分析实验室, 根据表 1^[13] 的评分标准分别对香肠的外观、组织状态、色泽、气味、口感 5 项指标进行感官评价, 单项指标采取十分制打分, 总分为 50 分。样品去除肠衣后切成约 2 cm 厚的薄片, 在蒸箱中蒸煮 5 min, 分别放入相同的白盘中, 编号, 每次给感官评价人员呈递一个样品, 每个样品评定后用清水漱口。

1.2.5 挥发性风味物质测定 采用 GC-IMS 法测定香肠中挥发性风味物质组成, 参考田星等^[15] 的方法稍作修改。样品预处理: 取样品 2 g, 去除肠衣, 切成小颗粒状转移入 20 mL 顶空萃取瓶中, 密封, 60 ℃ 孵育 20 min 后进样。色谱条件: 色谱柱类型为 Rtx-WAX(15 m×0.53 mm, 1 μm), 柱温 60 ℃, 载气为 N₂, 流速为 1 mL/min, 升温程序为 45 ℃ 保持 3 min, 5 ℃/min 升至 90 ℃, 不保持, 10 ℃/min 升温至 230 ℃ 保持 6 min。质谱条件: 离子源温度为 200 ℃, 电离方式为电子电离, 电子能量为 70 eV, 发射电流为

120 μA, 扫描质量范围(m/z)为 30~550。

挥发性风味成分的定性分析采用 NIST 数据库和 IMS 数据库对比图谱出峰时间确定, 定量分析根据峰面积计算相对含量(%), 并采用 Reporter 插件进行差异谱图分析。

1.3 数据处理

每组实验设置三个重复, 实验结果以平均值±标准偏差表示, 数据处理采用 Microsoft Office 2021 Excel 和 IBM SPSS Statistics 22, 利用 Duncan 多重比较进行显著性分析, $P<0.05$ 表示组间存在显著性差异, 作图采用 Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 茶红素对中式香肠理化指标的影响

2.1.1 色度值 添加茶红素对中式香肠色度值的影响如表 2 所示。在贮藏期间, 不同加工处理组香肠的 L^* 值均随着时间的延长而下降, 前 3 d 下降较为明显, 7 d 后趋于稳定, 亮度的下降主要是由于香肠中水分含量逐渐下降导致肌肉对光的透射率降低, 从而使表面颜色变暗^[16]。贮藏 14 d 时, 与 N120 对照组相比, TR400 组和 TR300+N30 组 L^* 值无显著差异($P>0.05$), 而 TR200+N60 组和 TR100+N90 组的 L^* 值显著低于 N120 对照组($P<0.05$)。肉糜的 a^* 值结果表明, 添加茶红素能显著提升肉糜的红色($P<0.05$)。贮藏期(0 d)的 a^* 值结果表明, 只添加茶红素不利于

表 2 茶红素对中式香肠色度值的影响
Table 2 Effects of thearubigins on chromatic value of Chinese sausages

色度值	时间(d)	N120	TR400	TR300+N30	TR200+N60	TR100+N90
L^*	肉糜	68.79±1.50 ^a	65.83±2.32 ^{ab}	64.61±1.22 ^b	63.98±2.51 ^b	68.19±0.28 ^a
	0	55.18±2.04 ^a	52.98±1.87 ^{ab}	52.94±1.54 ^{ab}	49.67±1.48 ^b	52.93±1.61 ^{ab}
	3	46.32±0.26 ^c	48.52±1.77 ^{ab}	49.89±0.25 ^a	46.87±0.75 ^{bc}	49.01±1.84 ^{ab}
	7	46.09±1.48 ^a	43.84±1.19 ^{ab}	45.77±2.77 ^a	44.92±1.55 ^a	40.33±1.41 ^b
	14	44.03±0.07 ^a	43.71±1.24 ^{ab}	42.70±1.05 ^{abc}	41.60±0.14 ^c	42.12±1.28 ^{bc}
a^*	肉糜	10.44±0.24 ^c	14.58±0.72 ^a	12.44±0.34 ^b	14.41±1.00 ^a	14.00±0.77 ^a
	0	20.65±1.23 ^a	15.32±0.81 ^c	19.18±1.02 ^{ab}	19.13±0.98 ^{ab}	18.20±0.97 ^b
	3	18.75±0.55 ^a	13.00±0.42 ^c	18.44±0.28 ^a	18.46±0.11 ^a	16.59±0.77 ^b
	7	18.35±0.41 ^a	12.36±0.63 ^c	16.34±0.60 ^b	17.42±1.06 ^{ab}	16.48±0.81 ^b
	14	18.75±0.95 ^a	13.29±0.31 ^c	17.46±1.13 ^{ab}	17.66±0.55 ^{ab}	16.96±0.19 ^b
b^*	肉糜	12.15±0.39 ^c	13.19±0.58 ^{bc}	13.04±1.00 ^{bc}	15.13±0.67 ^a	13.39±0.29 ^b
	0	12.60±0.32 ^c	16.58±0.58 ^a	13.21±1.29 ^c	13.22±0.55 ^c	14.88±0.29 ^b
	3	10.16±0.29 ^b	15.19±0.35 ^a	10.71±0.67 ^b	9.59±0.79 ^b	10.61±0.99 ^b
	7	12.45±1.56 ^{ab}	14.01±1.43 ^a	11.13±0.52 ^{bc}	9.89±1.02 ^c	11.18±0.25 ^{bc}
	14	12.75±0.73 ^a	12.57±1.33 ^a	10.64±0.18 ^b	10.10±0.68 ^b	11.16±1.10 ^{ab}

注: 同一行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$), 表6、表7同。

香肠的呈色反应,茶红素与亚硝酸钠复配可使香肠获得较高的红度值。随贮藏时间延长,香肠 a^* 值略有下降, a^* 值下降主要是由于肌红蛋白被氧化成高铁肌红蛋白造成的,脂肪氧化、pH 升高及亚硝酸钠被分解均可能引起香肠的红度下降^[17]。在整个贮藏期(0~14 d)内,TR200+N60 组的 a^* 值均维持在与 N120 对照组无显著差异的水平($P>0.05$),说明该茶红素添加量下香肠样品红度与 N120 对照组相当。 b^* 值结果表明,在肉糜中添加茶红素能明显提升肉糜本身黄度与贮藏初期香肠的黄度。贮藏期第 14 d, TR400 组的黄度与 N120 对照组无显著差异($P>0.05$)。综合色度值结果,TR300+N30 组即添加 300 mg/kg 茶红素替代 75% 亚硝酸盐制备中式香肠,能获得与 N120 对照组相当的亮度值,而 TR200+N60 组即添加 200 mg/kg 茶红素替代 50% 亚硝酸盐,制备的香肠红度值与 N120 对照组最为接近,呈色效果与呈色稳定性较高。

2.1.2 水分活度 水分活度是香肠发酵与贮藏过程中的重要指标,在低水分活度下,可有效抑制病原微生物的生长^[18]。不同组别香肠样品的水分活度如表 3 所示,随贮藏时间的延长,所有样品的水分活度均呈下降趋势。这主要是由于贮藏过程中,香肠中的自由水逐渐散失,结合水占比增高,表现出较低的水分活度,而水分散失与微生物的快速生长繁殖有关^[19]。在肉糜中,茶红素添加组的水分活度均低于 N120 对照组,说明相较于添加亚硝酸钠,添加茶红素能够使肉糜对水分的结合程度更高。贮藏 14 d 时,各组香肠样品水分活度降至 0.5~0.6 水平,茶红素添加量对水分活度无明显影响,主要是由于贮藏后期,水分散失至一定程度,水分活度趋于稳定。

表 3 茶红素对中式香肠水分活度的影响
Table 3 Effects of thearubigins on water activity of Chinese sausages

组别	肉糜	0 d	3 d	7 d	14 d
N120	0.92±0.01 ^a	0.84±0.02 ^{ab}	0.78±0.01 ^{ab}	0.70±0.01 ^a	0.53±0.01 ^{cd}
TR400	0.89±0.01 ^b	0.83±0.01 ^b	0.76±0.01 ^c	0.70±0.00 ^a	0.60±0.04 ^a
TR300+N30	0.87±0.01 ^c	0.85±0.01 ^a	0.78±0.02 ^{bc}	0.69±0.02 ^{ab}	0.56±0.00 ^{bc}
TR200+N60	0.89±0.01 ^b	0.83±0.00 ^b	0.80±0.01 ^a	0.69±0.01 ^{ab}	0.57±0.01 ^{ab}
TR100+N90	0.89±0.02 ^b	0.83±0.01 ^b	0.77±0.01 ^{bc}	0.68±0.00 ^b	0.52±0.01 ^d

注:同一列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$);表 4、表 5 同。

2.1.3 pH 茶红素对中式香肠 pH 的影响如表 4 所示,添加茶红素的肉糜和储藏期第 0 d 时香肠的 pH 均显著低于 N120 对照组($P<0.05$),较低的 pH 可抑制肉制品中腐败菌的生长,从而保证产品安全性^[20]。贮藏期间,除 TR200+N60 组外,其余组别香肠样品 pH 均呈现先下降后上升趋势,pH 下降可能与烘制结束后微生物活动仍较为活跃有关,微生物代谢促进了碳水化合物分解产生有机酸,同时也有利于形成香肠独特的风味^[21];而后在贮藏期 7~14 d pH 回升,可能是因为在香肠内源酶和微生物共同作

用下,蛋白质发生水解生成肽、氨基酸和胺等碱性物质^[22],这与 WANG 等^[23]的研究结果一致。

表 4 茶红素对中式香肠 pH 的影响
Table 4 Effects of thearubigins on pH of Chinese sausages

组别	肉糜	0 d	3 d	7 d	14 d
N120	5.68±0.02 ^a	5.97±0.06 ^a	5.88±0.02 ^b	5.81±0.02 ^b	5.98±0.05 ^{ab}
TR400	5.51±0.01 ^c	5.88±0.03 ^b	5.76±0.03 ^d	5.72±0.01 ^c	5.84±0.03 ^c
TR300+N30	5.50±0.03 ^c	5.83±0.04 ^b	5.81±0.01 ^c	5.59±0.04 ^d	5.97±0.05 ^{ab}
TR200+N60	5.62±0.03 ^b	5.85±0.07 ^b	5.92±0.02 ^a	5.95±0.02 ^a	6.00±0.03 ^a
TR100+N90	5.51±0.03 ^c	5.87±0.03 ^b	5.75±0.02 ^d	5.72±0.03 ^c	5.91±0.05 ^b

2.2 茶红素对中式香肠脂肪氧化程度的影响

脂肪适度氧化产生的小分子化合物对于挥发性风味物质的产生有重要作用^[24],然而过度氧化会导致香肠品质劣变。酸价和 TBARS 值是表征油脂氧化程度的重要指标,可用于评价肉制品中脂肪的过氧化情况^[25]。香肠在贮藏期间的酸价变化如图 1 所示,烘制结束时,TR400 组酸价显著高于 NR200+N60 组和 TR100+N90 组($P<0.05$),说明茶红素与亚硝酸钠复配腌制能降低香肠中脂肪的氧化程度。在贮藏过程中,香肠样品的酸价均呈上升趋势,贮藏期第一周,酸价变化较为缓慢;贮藏期第二周,酸价上升趋势较为明显,第 14 d 时,N120 对照组香肠样品酸价最低,茶红素添加组中,TR200+N60 组未呈现显著性差异($P>0.05$)。香肠在贮藏期间的硫代巴比妥酸反应物(TBARS)值变化如图 2 所示,TBARS 值越高表明脂肪过氧化程度越大。贮藏 7 d 时,各组别 TBARS 值与 N120 对照组无显著差异($P>0.05$);贮藏 14 d 时,TR300+N30 组和 TR200+N60 组的 TBARS 值较低,与 N120 对照组无显著差异($P>0.05$)。钱峰等^[26]将铁观音茶多酚添加至鸭肉香肠中并研究其抗氧化效果,结果表明添加茶多酚能显著降低贮藏期间香肠脂肪的氧化程度,且添加至一定水平抗氧化效果趋于稳定。本研究中可能由于茶红素与亚硝酸钠协同作

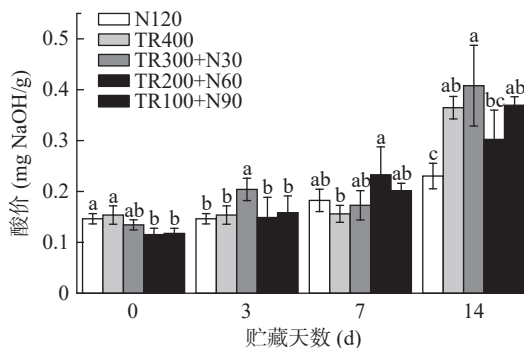


图 1 茶红素对中式香肠酸价的影响

Fig.1 Effects of thearubigins on acid value of Chinese sausages

注: N120 组表示添加 120 mg 亚硝酸钠, TR400 组表示添加 400 mg 茶红素, TR300+N30 组表示添加 300 mg 茶红素和 30 mg 亚硝酸钠, TR200+N60 组表示添加 200 mg 茶红素和 60 mg 亚硝酸钠, TR100+N90 组表示添加 100 mg 茶红素和 90 mg 亚硝酸钠;不同小写字母表示同一时间不同组别间存在显著性差异($P<0.05$);图 2 同。

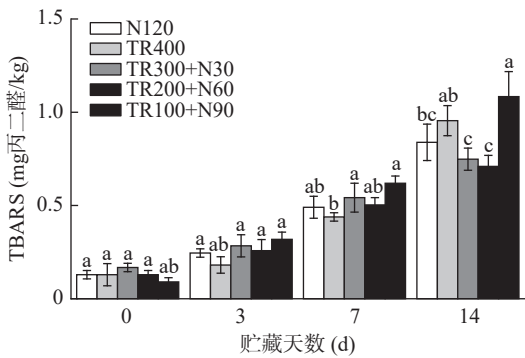


图 2 茶红素对中式香肠 TBARS 值的影响

Fig.2 Effects of thearubigins on TBARS value in Chinese sausages

用,在贮藏期较长(14 d)情况下,具有比单独添加茶红素更显著的抗氧化效果。综上,添加 200 mg/kg 替代 50% 亚硝酸钠可使香肠酸价和 TBARS 值在整个贮藏周期内均维持在较低水平,有利于减缓脂肪的过度氧化,从而抑制香肠酸败。

2.3 茶红素对中式香肠蛋白降解程度的影响

挥发性盐基氮是由肉制品中酶和腐败微生物分解蛋白质产生的氨及胺类等碱性含氮物质,可反映蛋白降解程度^[1],也是用来衡量肉制品是否腐败变质的重要指标^[27]。香肠中蛋白的适度降解可产生氨基酸和小肽,对风味和营养有积极作用^[28],过度降解会造成感官品质和消化性能的下降,因此需要控制蛋白的降解程度。如表 5 所示,随贮藏期延长,各组别香肠挥发性盐基氮含量均明显上升。贮藏 7 d 时,各组间样品挥发性盐基氮水平呈现显著差异($P<0.05$),其中 TR400 组和 TR300+N300 组含量最低。贮藏 14 d 时, N120 对照组挥发性盐基氮含量最低, TR200+N60 组与对照组含量无显著性差异,且与 TR300+N30 组含量接近($P>0.05$)。结果表明, TR300+N30 组即添加 300 mg/kg 茶红素替代 75% 亚硝酸钠对抑制蛋白降解的效果整体较好,随贮藏时间延长, TR200+N60 组对蛋白的抗降解效果更显著,可能是由于亚硝酸钠作用时间更为持久,而茶红素部分生物活性下降导致的。

表 5 茶红素对中式香肠挥发性盐基氮含量的影响(mg/100 g)
Table 5 Effects of thearubigins on volatile base nitrogen in Chinese sausages (mg/100 g)

组别	0 d	3 d	7 d	14 d
N120	3.85±0.35 ^b	5.25±0.92 ^b	12.25±0.92 ^{ab}	17.73±0.88 ^c
TR400	4.55±0.61 ^{ab}	7.00±0.35 ^a	10.97±0.73 ^{bc}	23.68±0.53 ^a
TR300+N30	4.31±0.20 ^{ab}	5.48±0.53 ^b	10.38±0.40 ^c	19.37±0.88 ^b
TR200+N60	5.01±1.32 ^{ab}	6.65±0.92 ^{ab}	12.48±0.80 ^a	18.55±0.61 ^{bc}
TR100+N90	5.60±0.85 ^a	6.07±0.81 ^{ab}	12.37±0.73 ^{ab}	22.40±1.05 ^a

2.4 茶红素腌制对中式香肠感官品质的影响

取贮藏 14 d 样品进行感官评价,结果如表 6 所示,外观方面,除 TR400 组,其余组别与 N120 对照组均无显著性差异($P>0.05$)。组织状态方面,

TR200+N60 组与 TR100+N90 组与 N120 对照组无显著性差异($P>0.05$)。色泽方面, N120 对照组和 TR200+N60 组得分最高,与色度值中较高的红度结果一致。气味方面,除 TR400 组,其余茶红素添加组得分均与 N120 对照组无显著性差异($P>0.05$)。口感方面, TR200+N60 组与 N120 对照组评分接近,表现出更好的咀嚼性。综合统计各方面评价得分,结果表明添加 200 mg/kg 茶红素替代 50% 亚硝酸钠可获得与全亚硝酸钠组香肠相当的感官品质。

表 6 茶红素对中式香肠感官评价的影响
Table 6 Effects of thearubigins on sensory evaluation of Chinese sausages

组别	N120	TR400	TR300+N30	TR200+N60	TR100+N90
外观	8.13±1.13 ^a	6.50±1.60 ^b	7.63±1.19 ^{ab}	8.31±1.22 ^a	7.94±1.08 ^a
组织状态	8.56±0.82 ^a	7.19±1.56 ^b	7.31±0.70 ^b	8.50±1.10 ^a	8.06±0.56 ^{ab}
色泽	8.31±0.80 ^a	6.13±0.83 ^c	7.00±0.76 ^b	8.13±0.79 ^a	7.75±0.89 ^{ab}
气味	7.25±1.04 ^a	5.75±0.89 ^b	6.50±0.76 ^{ab}	7.44±1.24 ^a	6.88±0.64 ^a
口感	8.06±0.94 ^a	6.88±1.00 ^c	7.00±0.93 ^{bc}	7.87±0.95 ^{ab}	7.38±0.52 ^{bc}
总分	40.31±0.96 ^a	32.45±1.23 ^d	35.44±0.86 ^c	40.25±1.02 ^a	38.01±0.76 ^b

2.5 茶红素对中式香肠挥发性风味物质组成的影响

基于以上指标检测和分析结果,选择贮藏 14 d 的三组香肠样品 N120 对照组、TR400 组和 TR200+N60 组进行挥发性风味物质测定。通过 GC-IMS 检测到的风味物质种类和相对含量统计如表 7 所示,3 组香肠样品中共检测到 39 种挥发性风味物质,其中包括 14 种酯类、12 种醛类、6 种醇类、4 种酮类以及其他类别。

酯类是 3 组香肠中种类占比最多的挥发性风味物质,其阈值较低,对风味贡献较大,其中,己酸乙酯、丁酸乙酯和乙酸乙酯三者相对含量较高,乙酸酯和乙酯类化合物可提供果香和花香气味,能协调脂肪氧化风味,更好的突出中式香肠特征风味^[29]。在 3 组样品中, N120 对照组的己酸乙酯相对含量显著高于 TR400 组和 TR200+N60 组,而 TR200+N60 组中乙酸乙酯相对含量与 TR400 组中丁酸乙酯相对含量显著高于 N120 对照组($P<0.05$)。CHEN 等^[30]研究表明,低盐发酵香肠中乙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯等具有较高的气味活度值(OAV 值),表明其对香肠的风味有较大的贡献作用。醛类物质阈值也较低,常见来源包括脂肪酸氧化分解以及蛋白质水解和氨基酸降解^[31]。醛类物质赋予肉制品青草的香气,如果含量较高可能会产生油腻和腐败的气味^[32]。在所检测到的醛类物质中,己醛相对含量最高,其次为丙醛和乙醛。 N120 对照组中丙醛和己醛相对含量显著高于 TR400 组($P<0.05$),而 TR200+N60 组的乙醛相对含量与 N120 对照组接近,均显著高于 TR400 组($P<0.05$)。另外, 3-甲基丁醛和 2-甲基丙醛可呈现麦芽香与可可香,能够使香肠风味更佳醇厚,这两种醛类在 TR200+N60 组中的含量显著高于 N120 对照组和 TR400 组($P<0.05$)。6 种醇类物

表 7 茶红素对中式香肠挥发性风味物质的影响
Table 7 Effects of thearubigins on volatile flavors of Chinese sausages

物质种类	相对含量(%)		
	N120	TR400	TR200+N60
酯类			
辛酸乙酯	0.09±0.02 ^a	0.09±0.00 ^a	0.09±0.01 ^a
乳酸乙酯	3.90±0.20 ^b	4.79±0.04 ^a	3.97±0.15 ^b
庚酸乙酯	0.08±0.00 ^a	0.07±0.01 ^b	0.07±0.00 ^b
己酸乙酯	13.06±0.15 ^a	12.35±0.05 ^b	12.76±0.02 ^b
戊酸乙酯	1.32±0.01 ^a	1.22±0.05 ^b	1.35±0.04 ^a
醋酸异戊酯	0.47±0.02 ^a	0.32±0.01 ^c	0.39±0.01 ^b
3-甲基丁酸乙酯	0.43±0.01 ^b	0.87±0.02 ^a	0.39±0.01 ^c
2-甲基丁酸乙酯	0.73±0.01 ^a	0.74±0.01 ^a	0.66±0.01 ^b
丁酸乙酯	6.60±0.05 ^b	7.26±0.04 ^a	6.82±0.11 ^b
异丁酸乙酯	1.07±0.02 ^b	1.35±0.02 ^a	0.97±0.03 ^c
丙酸乙酯	3.19±0.06 ^a	2.90±0.06 ^b	3.19±0.04 ^a
醋酸异丁酯	0.63±0.02 ^b	0.66±0.01 ^a	0.62±0.02 ^b
乙酸乙酯	7.89±0.09 ^b	7.95±0.04 ^b	8.13±0.04 ^a
甲酸乙酯	0.29±0.03 ^a	0.10±0.00 ^c	0.24±0.01 ^b
醇类			
1-戊醇	0.16±0.01 ^b	0.18±0.01 ^a	0.14±0.01 ^c
3-甲基-1-丁醇	0.99±0.02 ^a	0.85±0.01 ^c	0.96±0.04 ^b
1-丁醇	1.43±0.02 ^a	1.42±0.02 ^a	1.41±0.02 ^b
2-甲基-1-丙醇	1.70±0.00 ^a	1.61±0.00 ^b	1.64±0.02 ^b
乙醇	39.67±0.37 ^b	40.05±0.23 ^b	40.38±0.07 ^a
1-戊烯-3-醇	0.08±0.01 ^a	0.08±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b
醛类			
(E,E)-2,4-己二烯醛	0.11±0.02 ^a	0.09±0.02 ^a	0.11±0.01 ^a
壬醛	0.22±0.04 ^a	0.11±0.01 ^c	0.15±0.01 ^b
庚醛	0.10±0.01 ^a	0.04±0.00 ^b	0.09±0.01 ^a
(E)-2-戊烯醛	0.75±0.01 ^b	0.82±0.01 ^a	0.79±0.01 ^b
己醛	3.82±0.13 ^a	2.31±0.04 ^b	3.64±0.11 ^a
戊醛	0.09±0.01 ^a	0.04±0.00 ^b	0.08±0.01 ^a
3-甲基丁醛	0.42±0.04 ^b	0.35±0.00 ^c	0.73±0.03 ^a
2-甲基丙醛	0.06±0.01 ^b	0.04±0.00 ^c	0.08±0.00 ^a
丙醛	1.80±0.09 ^a	0.82±0.04 ^c	1.40±0.02 ^b
乙醛	1.17±0.13 ^a	1.02±0.01 ^b	1.09±0.04 ^a
丙烯醛	0.28±0.09 ^a	0.12±0.00 ^b	0.20±0.00 ^a
反-2-庚烯醛	0.06±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a	0.06±0.00 ^a
酮类			
二氢-2-(3H)-呋喃酮	0.40±0.02 ^a	0.35±0.01 ^b	0.43±0.01 ^a
环己酮	0.20±0.03 ^c	0.28±0.00 ^a	0.26±0.01 ^b
2-丁酮	0.11±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a	0.09±0.00 ^b
丙酮	2.22±0.05 ^b	3.86±0.02 ^a	2.38±0.12 ^b
其他类			
乙偶姻	3.16±0.12 ^b	3.63±0.04 ^a	3.00±0.15 ^b
2-丁基呋喃	0.81±0.02 ^a	0.74±0.00 ^c	0.76±0.01 ^b
二甲硫醚	0.42±0.03 ^a	0.36±0.01 ^b	0.41±0.01 ^a

质中,乙醇相对含量最高,一部分来源于腌制过程中添加的白酒,另一部分由发酵前期脂肪的氧化降解产生^[33],TR200+N60组中乙醇相对含量最高($P<0.05$),对香肠的风味提升可能起到积极作用。

对风味物质组成进行差异分析,图3为样品最近邻-欧氏距离图,图中距离越近表明样本间相似度

越高,结果表明,风味物质组成上 TR200+N60 组相较于 TR400 组更接近 N120 对照组。图4为 GC-IMS 谱图的差异图,经扣除参比(亚硝酸钠对照)信号峰得到,若实验组某物质信号相较于参比组更高,则标记为红色(如图中区域 a),反之标记为蓝色(如图中区域 b),颜色越深说明与参比的差异越大。差异组成图显示 TR200+N60 组颜色更浅,说明与 N120 对照组之间的差异更小。因此,添加 200 mg/kg 茶红素替代 50% 亚硝酸钠腌制香肠,可在保证香肠较优风味水平的基础上,减少亚硝酸盐的添加量。

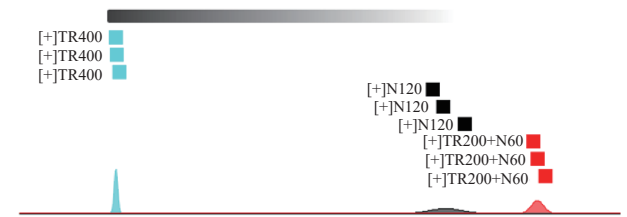


图3 样品最近邻-欧氏距离图
Fig.3 Nearest neighbor-Euclidean distance diagram of samples

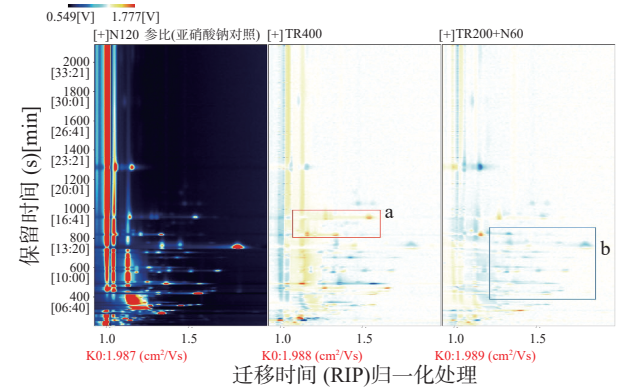


图4 样品 GC-IMS 谱图(差异图)
Fig.4 GC-IMS spectra of samples (difference map)

3 结论

本实验以不同配伍的茶红素和亚硝酸钠为加工辅料制备中式香肠,考察贮藏期间理化指标的变化,揭示了茶红素替代亚硝酸钠对中式香肠贮藏品质及风味的影响。研究发现,添加 200 mg/kg 茶红素替代 50% 亚硝酸钠,能获得与亚硝酸钠对照组相当的呈色效果,脂肪氧化和蛋白降解程度均维持在较低水平;与亚硝酸钠对照组相比,中式香肠的感官品质无显著差异,挥发性风味物质组成接近。在中式香肠加工过程中,添加适当比例的茶红素替代亚硝酸钠,能够保证贮藏期间理化品质和风味成分稳定,同时降低亚硝酸盐添加剂的使用量,提升产品的安全和健康属性。研究结果为传统肉制品的品质提升和茶叶功能性成分的应用拓展提供依据和参考。

参考文献

- [1] 吴雪燕,张培培,汪森,等.中式香肠蛋白氧化降解对产品品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(14):151-156. [WU X Y, ZHANG P P, WANG M, et al. Effect of protein oxidation and degradation on the quality of Chinese-style sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(14): 151-156.]
- [2] 赵明月,于颖颖,周浩然,等.新型肉制品护色技术研究进展[J].食品科技,2024,49(5):91-97. [ZHAO M Y, YU Y Y, ZHOU H R, et al. Research progress of new color protection technology in meat products[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 91-97.]
- [3] 孔令杰,邓洁莹,吴莹,等.发酵肉制品中微生物替代亚硝酸盐发色作用机理及应用研究进展[J].食品科学,2023,44(11):301-308. [KONG L J, DENG J Y, WU Y, et al. Research progress on chromogenic mechanism and application of microorganisms for replacing nitrite in fermented meat products[J]. Food Science, 2023, 44(11): 301-308.]
- [4] 徐燕,朱创,邵玲玲,等.红茶化学成分及生理活性的研究进展[J].安徽农业大学学报,2020,47(5):687-696. [XU Y, ZHU C, TAI L L, et al. Research advance on chemical components and biological activities of black tea[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(5): 687-696.]
- [5] 张湘琳,凌智辉,胡维霞,等.不同温度热风萎凋对红茶萎凋叶及成茶品质的影响[J].茶叶科学,2024,44(3):483-492. [ZHANG X L, LING Z H, HU W X, et al. Effects of different temperature hot air withering on withered leaves and tea quality of black tea[J]. Journal of Tea Science, 2024, 44(3): 483-492.]
- [6] 陈智雄,徐礼羿,张钰玉,等.超声波辅助浸提对红茶中茶黄素和茶红素浸出率的影响[J].蚕桑与茶叶科技,2020(4):27-31. [CHEN Z X, XU L Y, ZHANG Y Y, et al. Effects of ultrasonic-assisted extraction on the extraction rate of theaflavins and thearubigins from black tea[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2020(4): 27-31.]
- [7] LONG P P, RAKARIYATHAM K, HO C T, et al. Thearubigins: Formation, structure, health benefit and sensory property[J]. Trends in Food Science and Technology, 2023, 133: 37-48.
- [8] 李山,吴周和,吴正奇,等.茶红素的理化特性及生物学活性研究进展[J].食品与发酵工业,2016,42(8):273-278. [LI S, WU Z H, WU Z Q, et al. The physicochemical properties and bioactivity of thearubigins[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(8): 273-278.]
- [9] YANG Z Y, TU Y Y, XIA H L, et al. Suppression of free-radicals and protection against H₂O₂-induced oxidative damage in HPF-1 cell by oxidized phenolic compounds present in black tea[J]. Food Chemistry, 2007, 105(4): 1349-1356.
- [10] NAM S H, SHON M Y, PARK S K. Antioxidant activity of theaflavin and thearubigin separated from Korean microbially fermented tea[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2007, 12(1): 7-10.
- [11] MAITY S, UKIL A, KARMAKAR S, et al. Thearubigin, the major polyphenol of black tea, ameliorates mucosal injury in trinitrobenzene sulfonic acid-induced colitis[J]. European Journal of Pharmacology, 2003, 470(1): 103-112.
- [12] LI H H, CHEN Y F, TANG H G, et al. Effect of lysozyme and Chinese liquor on *Staphylococcus aureus* growth, microbiome, flavor profile, and the quality of dry fermented sausage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 112059.
- [13] 朱培培.红叶甜菜和糖基化酰基血红蛋白对中式香肠品质的影响研究[D].南京:南京农业大学,2017. [ZHU P P. Effects of red beet and glycosylated hemoglobin on the quality of Chinese sausages[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [14] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.228-2016 食品中挥发性盐基氮的测定[S].北京:中国标准出版社,2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.228-2016 Determination of volatile basic nitrogen in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [15] 田星,张越,汤兴宇,等.基于电子舌和气相色谱-离子迁移谱分析脂肪添加量对中式香肠风味的影响[J].肉类研究,2020,34(5):33-40. [TIAN X, ZHANG Y, TANG X Y, et al. Effect of fat content on the flavor of Chinese sausage analyzed using electronic tongue and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 33-40.]
- [16] 叶沁,孟祥河,陈黎洪.添加米糠腌制对酱鸭理化品质与脂肪氧化特性的影响[J].浙江农业学报,2024,36(3):634-642. [YE Q, MENG X H, CHEN L H. Effects of rice bran curing on physicochemical quality and fat oxidation characteristics of sauce duck[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(3): 634-642.]
- [17] 王琴.发酵香肠工艺优化及加工与贮藏期品质变化的研究[D].重庆:西南大学,2023. [WANG Q. Study on the technology optimization and quality changes during processing and storage of fermented sausage[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.]
- [18] 郭晶晶,陈莹燕.五种不同的包装方式对即食香肠保鲜效果的影响[J].中国调味品,2024,49(7):69-72. [GUO J J, CHEN Y Y. Effects of five different packing methods on preservation effects of instant sausages[J]. China Condiment, 2024, 49(7): 69-72.]
- [19] 张月,杨新玥,黄莉,等.乳酸菌复配发酵对川味香肠品质及酪胺含量的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(6):83-90. [ZHANG Y, YANG X Y, HUANG L, et al. Effects of combined fermentation with lactic acid bacteria on quality and tyramine content of Sichuan sausage[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6): 83-90.]
- [20] 罗登林,武延辉,徐宝成.菊粉取代玉米磷酸酯双淀粉对香肠质构和感官特性的影响[J].现代食品科技,2015,31(7):211-217,210. [LUO D L, WU Y H, XU B C. Effect of different substitution ratios of inulin for maize distarch phosphate on sensory and textural properties of sausages[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(7): 211-217,210.]
- [21] ESSID I, HASSOUNA M. Effect of inoculation of selected *Staphylococcus xylosus* and *Lactobacillus plantarum* strains on biochemical, microbiological and textural characteristics of a Tunisian dry fermented sausage[J]. Food Control, 2013, 32(2): 707-714.
- [22] DA COSTA R J, VOLOSKI F L S, MONDADORI R G, et al. Preservation of meat products with bacteriocins produced by lactic acid bacteria isolated from meat[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 1-12.
- [23] WANG D B, HU G H, WANG H T, et al. Effect of mixed starters on proteolysis and formation of biogenic amines in dry fermented mutton sausages[J]. Foods, 2021, 10(12): 2939.
- [24] HUANG L, XIONG Y L, KONG B H, et al. Influence of storage temperature and duration on lipid and protein oxidation and flavour changes in frozen pork dumpling filler[J]. Meat Science, 2013, 95(2): 295-301.
- [25] 王琴,李洪军,杨莉,等.直接式商业发酵剂对发酵香肠品质特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(16):103-111. [WANG Q, LI H J, YANG L, et al. Effect of commercial direct vat set cultures on the quality of fermented sausages[J]. Food and Fermenta-

tion Industries, 2023, 49(16): 103–111.]

[26] 钱峰, 李超. 铁观音茶多酚对鸭肉发酵香肠抗氧化性作用的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(2): 33–35. [QIAN Feng, LI Chao. Study on antioxidant activity of Tieguanyin tea polyphenol on fermented duck sausage[J]. Food Industry, 2015, 36(2): 33–35.]

[27] 黄业传, 王洋, 苟兴能, 等. 不同贮藏温度下两种发酵香肠品质变化及货架期预测模型的建立[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 343–351. [HUANG Y C, WANG Y, GOU X N, et al. The quality changes of two fermented sausages under different storage temperatures and the establishment of prediction models for their shelf life[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 343–351.]

[28] BERARDO A, CLAEYS E, VOSSSEN E, et al. Protein oxidation affects proteolysis in a meat model system[J]. *Meat Science*, 2015, 106: 78–84.

[29] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELLAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on the evolution of flavor compounds in probiotic dry-fermented sausages during ripening[J]. *Meat Science*, 2015, 100: 41–51.

[30] CHEN Q, HU Y Y, WEN R X, et al. Characterisation of the flavour profile of dry fermented sausages with different NaCl substitutes using HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose and electronic tongue[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108338.

[31] DOMINGUEZ R, PURRINOS L, PEREZ-SANTAESCOLASTICA C, et al. Characterization of volatile compounds of dry-cured meat products using HS-SPME-GC/MS technique[J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(6): 1263–1284.

[32] 张鹏, 赵金山, 臧金红, 等. 发酵肉制品中的特征风味与微生物之间的关系研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 380–391. [ZHANG P, ZHAO J S, ZANG J H, et al. Progress of research on the relationship between characteristic flavor and microorganisms in fermented meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 380–391.]

[33] 宋永, 乔娜, 温婷婷, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析哈尔滨风干肠中的挥发性风味化合物[J]. 食品科学, 2014, 34(2): 224–226. [SONG Y, QIAO N, WEN T T, et al. HS-SPME-GC/MS analysis of volatile flavor components in Harbin air-dried sausages[J]. Food Science, 2014, 34(2): 224–226.]