

红曲菌在发酵香肠品质提升及风味物质合成中的作用

高祥东^{1,2}, 张兴荣², 张翠红³, 黄艳红^{1,2*}

(1. 山东省齐鲁工业大学食品科学与工程学部, 山东济南 250300)

(2. 山东省食品发酵工业研究设计院, 山东济南 250000)

(3. 桓台县农业农村局农村改革发展服务中心, 山东淄博 256400)

摘要: 为探究红曲菌 2SH 在发酵香肠中的应用潜力, 本研究首先对该菌株的产毒特性、生长性能及加工耐受性进行系统探究, 测定其桔霉素产量、生长状况、耐酸性、耐盐性及亚硝酸盐降解能力, 并进一步分析红曲菌复合发酵剂对香肠品质及风味的影响。结果表明, 红曲菌 2SH 无桔霉素产出, 具备优良的加工耐受特性, 在 pH 值 3、盐浓度 6% 的胁迫环境下可正常生长, 且对亚硝酸盐降解率可达 97.02%。以单一清酒乳杆菌 2-Y4-2 发酵香肠为对照, 开展清酒乳杆菌与红曲菌 2SH 复合发酵香肠试验, 理化指标检测结果显示, 红曲菌复合发酵可显著提升香肠乳酸菌总数 (由 8.62 log CFU/g 增至 8.86 log CFU/g) 与红度值 (由 6.74 提升至 13.83), 有效降低香肠水分含量 (由 0.845 降至 0.817) 与亚硝酸盐残留量 (由 2.11 mg kg⁻¹ 降至 1.67 mg kg⁻¹)。挥发性风味物质分析表明, 红曲菌 2SH 复合发酵可显著富集香肠特征风味组分, 有效提升 2-辛烯-1-醇、2,3-丁二醇、癸醛、己酸乙酯、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮等关键风味化合物含量。综上所述, 红曲菌 2SH 可显著优化发酵香肠的理化品质、色泽特性及风味构成, 安全性与加工适配性良好, 在发酵香肠加工领域具备良好的应用前景, 可为功能性发酵香肠产品开发及红曲菌发酵产业的发展提供理论依据与数据支撑。

关键词: 红曲菌; 桔霉素; 发酵香肠; 风味物质

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0532

The Role of *Monascus* in Improving the Quality of Fermented Sausages and the Synthesis of Flavor Compounds

GAO Xiangdong^{1,2}, ZHANG Xingrong², ZHANG Cuihong³, HUANG Yanhong^{1,2*}

(1.School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology, Shandong Province, Jinan 250300, China)

(2.Shandong Food Ferment Industry Research, Qilu University of Technology, Jinan 250000, China)

(3.The Agriculture and Rural Affairs Bureau of Huantai County, Zibo 256400, China)

Abstract: To investigate the application potential of *Monascus* strain 2SH in fermented sausages, systematic evaluations were first conducted on its toxigenic properties, growth performance, and processing tolerance, including citrinin production, growth behavior, acid and salt tolerance, and nitrite degradation ability, followed by an assessment of the effects of a *Monascus*-based composite starter culture on sausage quality and flavor. The results showed that strain 2SH did not produce citrinin and exhibited excellent processing tolerance, being capable of normal growth under stress conditions of pH 3 and 6% salt concentration, with a nitrite degradation rate reaching 97.02%. Using sausage fermented with *Lactiplantibacillus sakei* 2-Y4-2 as the control, a co-fermentation experiment with *L. sakei* and *Monascus* strain 2SH was conducted. Physicochemical analyses indicated that composite fermentation significantly increased total lactic acid bacteria counts (from 8.62 to 8.86 log CFU/g) and redness values (from 6.74 to 13.83), while reducing moisture content (from 0.845 to 0.817) and residual nitrite levels (from 2.11 to 1.67 mg kg⁻¹). Analysis of volatile flavor compounds indicated that co-fermentation with *Monascus* strain 2SH significantly enriched characteristic flavor components of the sausage, leading to increased levels of key aroma compounds, including 2-octen-1-ol, 2,3-butanediol, decanal, ethyl hexanoate, and (E,E)-3,5-octadien-2-one. In summary, *Monascus* strain 2SH can significantly improve the physicochemical quality, color attributes, and flavor profile of fermented sausages. It demonstrates good safety and processing compatibility and shows promising application potential in fermented sausage production. These findings provide a theoretical basis and data support for the development of

收稿日期: 2026-04-08; 修回日期: 2026-07-04; 接受日期: 2026-07-06

作者简介: 高祥东 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: 19943843943@163.com

通讯作者: 黄艳红 (1980-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 发酵食品及功能益生菌, E-mail: 15169033980@163.com

functional fermented sausage products and the advancement of *Monascus*-based fermentation industries.

Key words: monascus; citrinin; fermented sausage; flavor compounds

发酵香肠是在特定条件下通过自然或人工接种有益微生物发酵制成的肉制品, 具有独特的风味、质地和安全性^[1]。风味是发酵香肠最重要的食用品质, 直接影响消费者的接受程度。发酵香肠的风味由滋味和香气构成, 滋味来源于肉本身及发酵过程中产生的呈味物质, 香气多跟加热过程中释放的挥发性风味化合物有关^[2]。香肠发酵过程中微生物代谢与各种生化反应(如酶解、美拉德反应、脂质与蛋白质氧化)协同作用, 赋予了产品独特的风味轮廓。我国传统的发酵香肠多采用自然发酵模式, 靠经验操作^[3], 粗犷的发酵条件易引发腐败菌和致病菌污染, 同时难以保证产品质量和安全性。为此, 人们开始在传统加工工艺的基础上加入发酵剂实现对发酵过程的有效控制^[4]。目前香肠常用的发酵剂有植物乳杆菌、清酒乳杆菌、耐盐乳杆菌、纳地青霉、米根霉、红曲霉、汉逊氏酵母菌、假丝酵母菌等^[5]。其中红曲菌是中国传统发酵食品中重要的微生物之一, 已有超过千年的应用历史, 它嗜酸耐酸, 能够合成多种功能成分, 如红曲色素、洛伐他汀、麦角固醇和 γ -氨基丁酸等^[6]。清酒乳杆菌具有产酸速率快、环境适应性强等特点^[7], 同时可产生细菌素形成竞争性优势, 主导菌群结构^[8], 此外它还可以产生酰基磷酸酶, 促进挥发性风味物质的生成^[9]。

现有红曲菌应用研究多聚焦于红曲米、米酒等谷物发酵制品, 在肉制品加工中的开发与应用仍相对薄弱。已有少量研究证实, 在香肠发酵体系中引入红曲菌, 可有效促进脂质氧化、蛋白质水解及肌原纤维蛋白降解, 对肉制品发酵过程具有积极调控作用^[10]。发酵香肠的最终品质高度依赖发酵菌种类型及配伍方式, 不同菌种组合可形成差异化代谢产物谱, 进而显著影响产品风味品质、营养价值及功能特性。已有研究表明, 将红曲菌、酿酒酵母与乳酸杆菌复配应用于鱼糜发酵香肠, 可加速体系 pH 值降低、抑制肠杆菌等杂菌增殖, 同时促进肌肉蛋白适度水解, 改善产品风味与质构特性^[11]; 红曲霉与乳酸菌共发酵体系亦可强化氨基酸代谢通路, 显著提升发酵产品风味品质^[12]。尽管现有研究已验证红曲菌在肉制品发酵中的应用潜力, 但相关研究多集中于单一发酵或固定复合发酵体系, 缺乏对红曲菌单菌发酵与乳酸菌复合发酵效果的系统性对比分析, 关于菌种复配对发酵香肠品质、风味的差异化调控机制仍有待深入完善。

本研究结合我国香肠的传统发酵工艺, 选用前述报道在香肠风味成分上已展现初步优良结果的清酒乳杆菌, 在此基础上添加红曲菌进行组合发酵, 通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用等技术系统评估红曲菌对发酵香肠理化特性及风味的影响, 阐明菌株在发酵过程中的功能, 为发酵肉制品风味调控与品质提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试剂: 麦芽汁培养基, 青岛海博生物科技有限公司; 五常大米, 五常大米集团有限公司; 亚硝酸钠(分析纯, $\geq 99.0\%$)、对氨基苯磺酸(AR 级, $>99.5\%$)及 N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐(BR 级, $>98\%$), 上海阿拉丁生化科技有限公司; 乙腈(HPLC 级)、甲醇(HPLC 级)、磷酸(HPLC 级)、乙酸(LC-MS 级)、甲苯(分析级)和乙酸乙酯(分析级), 上海麦克林生化有限公司。

菌株: 红曲菌 2SH 和清酒乳杆菌 2-Y4-2。其中红曲菌 2SH 从市售红曲米中分离筛选获得, 经 ITS rDNA 基因测序鉴定为 *Monascus ruber*, 其序列已保藏于 GenBank 数据库, 登录号为 PX688174。清酒乳杆菌 2-Y4-2 从萨拉米香肠中分离筛选获得。

1.2 主要仪器设备

XH-B 涡旋混合仪, 江苏天翎仪器有限公司; T2600 分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司; 2041 型绞肉机, 河南新飞电器有限公司; LabMaster-aw neo 水分活度仪, 瑞士 Novasina 公司; BXC-1000 恒湿恒温培养箱, 上海博迅实业有限公司; TA.XT PlusC 质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; Aeros 色度计, 美国 Hunter Lab 公司; PB-10 pH 计, 德国 Sartorius 公司; GI80-TW 高压灭菌锅, 致微仪器有限公司; Alphaclean1300 超净工作台, 上海力新仪器有限公司; GCMS-8890-7000D 气相色谱-质谱联用, 美国安捷伦公司; SB-5200T 超声波清洗器, 宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发酵种子液制备

红曲菌的培养选用麦芽汁培养基,清酒乳杆菌选用 MRS 培养基。

大米培养基制备:大米加水浸泡 8 h,分装至 250 mL 三角瓶中,每瓶 100 g,121 °C 灭菌 20 分钟。

清酒乳杆菌种子液:将清酒乳杆菌 2-Y4-2 通过平板划线法转接至 MRS 固体培养基中,37 °C 培养 24 h,挑取单菌落转接至 MRS 液体培养基中,相同条件培养。

红曲菌种子液:将红曲菌转接至麦芽汁固体培养基中,35 °C、180 r min⁻¹ 培养 48 h,挑取单菌落转接于麦芽汁液体培养基,相同条件培养。

红曲菌发酵剂制备:红曲菌种子液按 10 wt.% 接种于大米培养基,搅拌均匀,于 30 °C 静置培养 4 d,发酵结束后研磨备用。

1.3.2 红曲菌安全性评价

以桔霉素的含量为指标,评估红曲菌的安全性。桔霉素测定方法如下:

准确称取 2.0 g 红曲菌发酵剂于 5 mL 磨砂玻璃试管中,加入 2 mL 萃取剂(甲苯:乙酸乙酯:甲酸=7:3:1, V/V/V, TEF),涡旋 30 s,超声功率为 280 W 提取 10 min,10 000 r min⁻¹ 离心 2 min,残渣重复萃取 1 次,合并两次上清液,用 0.22 μm 有机滤膜过滤后用高效液相色谱仪进行检测,色谱柱为 Agilent TC-C18 液相色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm),流动相为乙腈:磷酸(75%:25%)(V/V) 波长为 331 nm,流量为 1 mL min⁻¹,柱温 30 °C。

1.3.3 菌株发酵性能分析

1.3.3.1 生长曲线测定

红曲菌 2SH:将红曲菌加入麦芽汁液体培养基,接种量为 2% (V/V),35 °C、180 r min⁻¹ 条件下培养 96 h,每 12 h 取样,过滤收集菌体,85 °C 烘干至恒重后,记录菌体干重,并绘制生长曲线。

清酒乳杆菌 2-Y4-2:清酒乳杆菌按 2% (V/V) 的接种量转接至 MRS 培养基中,37 °C 培养 24 h。每 2 h 取样,测定其 600 nm 处的吸光度值,绘制生长曲线。

1.3.3.2 耐盐性测定

将红曲菌和清酒乳杆菌的种子液按 2% (V/V) 的比例分别接种于含有不同 NaCl 的麦芽汁和 MRS 液体培养基中,NaCl 分别为 0 wt.%、2 wt.%、4 wt.%、6 wt.%、8 wt.%,不同时间取样测定菌体量,培养及测定方法同 1.3.3.1。

1.3.3.3 耐酸性测定

将红曲菌和清酒乳杆菌的种子液按 2% (V/V) 的比例分别接种于不同 pH 值的麦芽汁和 MRS 液体培养基中,pH 值分别为 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0,两菌培养及测定方法同 1.3.3.1。

1.3.3.4 亚硝酸盐降解率测定

亚硝酸盐标准曲线的绘制,参考 GB 5009.33-2016《食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》^[13]。亚硝酸盐标准使用液制备:准确称取 0.100 0 g 于 110~120 °C 干燥恒重的亚硝酸钠,加水溶解并移入 500 mL 容量瓶中,定容后吸取 2.50 mL,稀释至 100 mL,备用。分别吸取 0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00、1.50、2.00、2.50 mL 亚硝酸钠标准使用液置于 50 mL 比色管中,加入 2.0 mL 对氨基苯磺酸,混匀避光静置 5 min,加入 1.0 mL 盐酸萘乙二胺溶液充分混匀,定容至 25.0 mL,避光静置 15 min,于波长 538 nm 处测吸光度,并绘制标准曲线。

亚硝酸盐降解率测定:将红曲菌和清酒乳杆菌的种子液按 2% (V/V) 的接种量接种于含 200 mg L⁻¹ 亚硝酸钠的相应培养基中,培养及取样方法同 1.3.3.1,样品 4 °C、5 000 r min⁻¹ 离心 10 min,取上清液测定亚硝酸盐残留量,并根据公式(1)计算菌株对亚硝酸盐的降解率。

$$D = \frac{D_0 - D_t}{D_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——亚硝酸盐降解率, %;

D_0 ——对照组中亚硝酸盐残留含量, mg L⁻¹;

D_t ——实验组中亚硝酸盐残留含量, mg L⁻¹。

1.3.3.5 红曲菌与乳酸菌协同性测定

将乳酸菌接种于含有 200 mg L⁻¹ 亚硝酸钠的 MRS 液体培养基中, 接种量为 2% (V/V), 共培养组 (RH) 添加 200 μL 红曲菌种子液, 对照组 (CK) 添加同体积无菌水, 35 °C 恒温培养 48 h, 不同时间取样测定乳酸菌活菌数、pH 值及亚硝酸盐降解率。

1.3.4 香肠样品制备

选择肥瘦比例 8:2 的新鲜猪后腿肉切碎, 依次加入 1.6 wt.% 食盐、1.3 wt.% 白糖、0.3 wt.% 辣椒粉、0.55 wt.% 生姜粉、0.32 wt.% 五香粉、1.5 wt.% 白酒、0.008 wt.% 亚硝酸钠, 搅拌均匀, 4 °C 腌制 6 h。

对照组 (CK) 接种清酒乳杆菌 2-Y4-2, 接种量为 1×10⁶ CFU/g。

实验组 (RH) 接种红曲菌 2SH 预发酵剂和清酒乳杆菌 2-Y4-2 (清酒乳杆菌:红曲菌=1:1), 接种量为 1×10⁶ CFU/g。

混合均匀后, 灌入天然猪肠衣, 温度 20 °C、相对湿度 90%, 发酵 9 d。分别于 1、3、5、7、9 d 取样, 进行相关理化指标与风味物质检测。

1.3.5 发酵香肠理化指标测定

菌落总数和乳酸菌计数: 称取 5 g 香肠样品, 加入 45 mL 生理盐水匀浆, 稀释后涂布到平板计数琼脂 (PCA) 和 MRS 琼脂培养基, 37 °C 下培养 48 h, 计数。

水分测定: 准确称取一定量样品, 105 °C 干燥 2~4 h 后称重直至恒重 (质量差≤2 mg) 重复测定三次。

水分活度测定: 称取 10 g 样品切碎, 放入测定杯中, 用 Novasina 水分活度仪进行检测。

pH 值测定: 称取一定量样品, 置于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 蒸馏水, 4 °C、5 000 r min⁻¹ 匀浆 30 s, 重复 3 次, 过滤, 测定 pH 值。

色泽测定: 样品绞碎后压制成直径 2 cm、高 1 cm 的圆柱体, 使用色度计测定其 L* (亮度)、a* (红度) 与 b* (黄度) 值, 每份样品重复测定 6 次并取平均值^[14]。

亚硝酸盐含量测定: 香肠样品绞碎后, 准确称取 5 g 置于 250 mL 具塞锥形瓶中, 加 12.5 mL 饱和硼砂溶液搅拌均匀, 加入 150 mL 水沸水浴中加热 15 min, 冷却至室温, 转移至 200 mL 容量瓶中, 加入 5 mL 106 g L⁻¹ 亚铁氰化钾溶液, 摇匀, 再加入 5 mL 220 g L⁻¹ 乙酸锌溶液沉淀蛋白质。定容静置 30 min, 除去脂肪层, 取上清液按 1.3.3.4 测定方法测定亚硝酸盐含量。

硬度与弹性测定: 将香肠切为高 2.5 cm 的圆柱体, 选用 TA.XT PlusC 质构仪分析, p/50 圆形探头, 测前、测试、测后速度分别为 2、5、5 mm s⁻¹, 测定间隔时间 2 s, 压缩比为 50%, 初始力为 0.3 N, 平行测定 3 次^[15]。

桔霉素测定: 测定方法同 1.3.2。

1.3.6 风味物质的测定

采用顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用技术分析香肠样品中挥发性化合物。取 500.00 mg 样品置于顶空样品瓶中, 加入 20 μL 浓度为 10 μg mL⁻¹ 内标溶液 (3-己酮-2,2,4,4-d₄), 60 °C 平衡 5 min 后, 120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶, 在 60 °C 条件下进行 15 分钟顶空萃取, 于 250 °C 下解析 5 min 后进行 GC-MS 分离鉴定。使用 DB-5MS 毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm) 分离, 载气为高纯氦气, 恒流流速 1.2 mL min⁻¹, 进样口温度 250 °C, 不分流进样, 溶剂延迟 3.5 min。程序升温: 40 °C 保持 3.5 min, 以 10 °C min⁻¹ 升至 100 °C, 再以 7 °C min⁻¹ 升至 180 °C, 最后以 25 °C min⁻¹ 升至 280 °C, 保持 5 min。按照 GB 23200.8-2016 以离子检测模式 (SIM), 离子源温度设置为 230 °C, 四级杆温度 150 °C, 质谱接口温度 280 °C, 电子能量 70 eV。将谱图与 NIST 谱库中标准谱图进行比对鉴定挥发性化合物, 将保留指数 (RI) 与文献值进行二次比对定性, 同时计算内标物与目标化合物的峰面积比, 得到样品中挥发性成分的相对含量, 保留指数计算公式如下^[16]:

$$RI = 100 \times n + \frac{100(m-n)(t_i - t_n)}{t_m - t_n} \quad (2)$$

式中:

t_i ——为待测物的保留时间;

m ——为待测物出峰后碳原子个数;

n ——为待测物出峰前碳原子个数;

t_m ——为待测物出峰之后烷烃的保留时间;

t_n ——为待测物出峰之前烷烃的保留时间。

通过计算各挥发性化合物的相对气味活性值 (ROAV) 评估其对整体气味的贡献。

1.4 数据分析

所有试验操作均重复 3 次, 实验结果用平均值 $\pm$ 标准差表示。通过 SPSS 进行实验数据分析, Origin 软件绘制数据图。

2 结果与讨论

2.1 红曲菌安全性分析

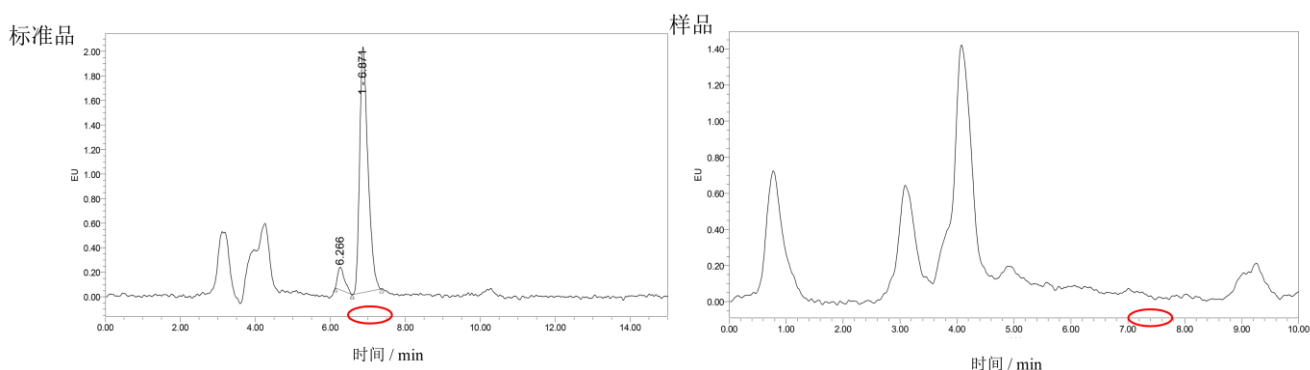


图 1 桔霉素色谱图分析

Fig.1 Chromatogram Analysis of Citrinin

桔霉素是红曲霉属在发酵过程中产生的真菌毒素, 具有一定的肾脏毒性, 桔霉素的合成主要受菌株自身携带的聚酮合酶基因 *pksCT*, 以及发酵工艺与条件的影响^[17]。红曲霉菌株不产桔霉素是确保产品安全 and 质量稳定的重要措施。本研究测定红曲菌发酵剂中桔霉素的含量, 结果如图 1 所示。由图 1a 可知桔霉素标品出峰时间为 7 min, 而样品在 7 min 附近未出峰, 表明样品中不存在桔霉素。

2.2 菌株发酵特性分析

2.2.1 生长能力分析

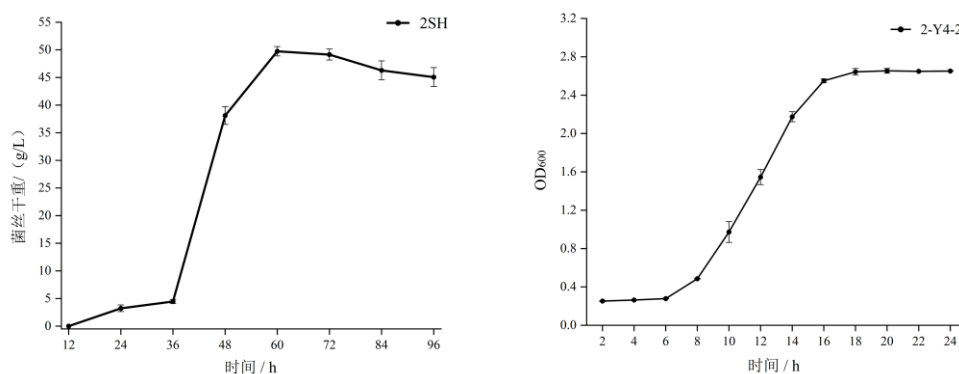


图 2 菌株生长曲线

Fig.2 Growth curves of the strains

由图 2 可知, 红曲菌和清酒乳杆菌生长趋势均符合微生物 S 型生长曲线。红曲菌在 0~36 h 生长较为缓慢, 为生长延缓期; 在 36~60 h 菌体干重变化速度较快, 为生长对数期; 在 60 h 后菌丝干重的增加速度变慢, 红曲菌逐渐进入稳定期。与红曲菌相比, 清酒乳杆菌生长周期较快, 在培养 6 h 后即进入对数期, 16 h 时达到稳定期。研究表明, 清酒乳杆菌可以通过快速酸化降低体系 pH 值在香肠发酵中具有重要作用: 一方面可以抑制杂菌的生长,

如 Shen 等^[18]发现清酒乳杆菌可以显著抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌；另一方面较低的 pH 值体系为红曲菌营造了适宜的生长环境。已有研究表明^[19]，红曲菌在 pH 值为 5.0 环境下培养的孢子产量可达 pH 值 7.0 条件下的 3 倍；本研究所用红曲菌相较于周珂等研究的红曲菌生长周更短，可更早进入稳定期，有利于次级代谢产物积累，如红曲色素。已有研究证实^[20]，红曲色素在对数期开始合成，当菌株提前进入对数生长阶段，能够延长色素合成时间，提高红曲色素积累。

2.2.2 耐酸性测定

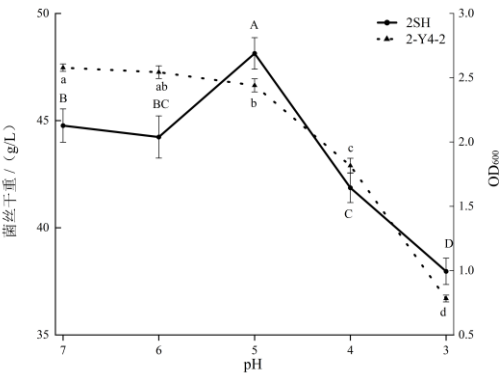


图3 菌株耐酸性分析

Fig.3 Analysis of bacterial strain acid resistance

注：不同大写字母表示 2SH 显著性差异 ($P<0.05$)；不同小写字母表示 2-Y4-2 显著性差异 ($P<0.05$)。下图同。

由图 3 可知红曲菌 2SH 的耐酸性随 pH 值降低呈先升高后降低的趋势，在 pH 值 5.0 条件下菌株生长状态最佳，菌丝干重为 48.13 g L^{-1} ，证实了红曲菌偏好酸性环境的生长特性。随着 pH 值持续下降红曲菌生长开始受到抑制，当 pH 值 3.0 时菌丝干重为 37.96 g L^{-1} ，与最优生长环境下峰值相比仅下降 10.34 g L^{-1} ，表明红曲菌 2SH 具备优异的耐酸能力。这与现有从红曲米中分离出来的红曲菌耐酸性研究基本一致^[21]；清酒乳杆菌 2-Y4-2 的耐酸性随 pH 值降低逐渐受到抑制，当 pH 值降至 4.0 时菌株生长能力显著下降，当 pH 值低至 3.0 时，菌株 2-Y4-2 仍能生长 ($\text{OD}_{600\text{nm}}$ 值为 0.78)，可知菌株 2-Y4-2 也具有较强的耐酸性。而通常发酵肉制品所需 pH 值范围为 4.0~5.5，由此可知菌株 2-Y4-2 和 2SH 可满足后续香肠发酵试验。

2.2.3 耐盐性分析

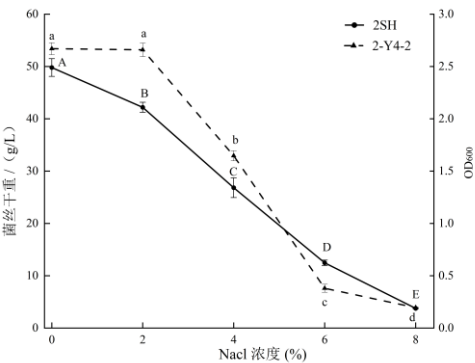


图4 菌株耐盐性

Fig.4 Salt tolerance of the strain

菌株的耐盐性测定结果如图 4 所示，两株菌的菌体量随 NaCl 含量升高均呈逐渐下降的趋势，其中红曲菌在 NaCl 含量为 0%~2% 时生长良好，菌丝干重维持在较高水平，当 NaCl 含量升至 4% 时，菌丝干重开始下降，至 6% 时菌丝干重仅为 12.46 g L^{-1} ，表明高盐环境能够抑制红曲菌生长；清酒乳杆菌 2-Y4-2 的 OD_{600} 值在 NaCl 含量为 2% 时菌株生长没有显著变化，当 NaCl 含量达到 4% 以上时，生长受到明显抑制，当 NaCl 含量达到 8%，基本停止生长。而发酵香肠中盐浓度通常维持在 2.5% 左右，由此可以看出菌株 2-Y4-2 和 2SH 均具备在发酵肉制品盐度环境下生长的潜力。多项研究表明，在食品发酵过程中，高盐环境会抑制微生物活性，导致发酵时间延长，香肠口感

变差。具有良好的耐盐性能，对于红曲菌的应用具有重要意义^[22]。

2.2.4 亚硝酸盐降解率测定

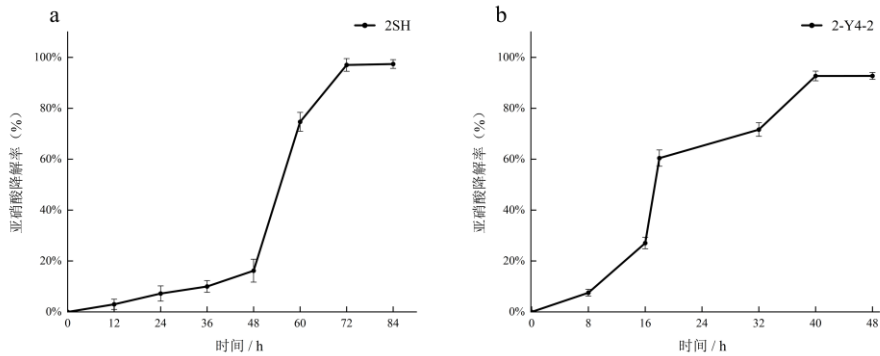


图 5 发酵液中亚硝酸盐降解率的变化

Fig.5 Changes in the degradation rate of nitrite in the fermentation broth

注：图 a 为红曲菌 2SH 亚硝酸盐降解率变化趋势，图 b 为清酒乳杆菌 2-Y4-2 亚硝酸盐降解率变化趋势。

亚硝酸盐是发酵香肠中常用的发色剂与抑菌剂，过量残留会导致产品色泽发暗、风味劣变，长期摄入会显著提升消化道肿瘤等疾病的发病风险^[23]。因此，通过利用乳酸菌和红曲菌亚硝酸盐降解特性，既能精准控制残留量，又能避免过度添加带来的风味失衡，同时维持稳定色泽，延长产品货架期。如图 5 所示，本研究所筛选使用菌均表现出优异的亚硝酸盐降解能力，其中红曲菌的降解效果尤为显著，清酒乳杆菌 2-Y4-2 和红曲菌 2SH 亚硝酸盐降解率分别为 92.72%和 97.02%。这一结果与刘奇等^[24]的研究发现相似，其从低硝腊肉中分离的清酒乳杆菌 FBG1-D33 同样表现出 90.00%以上的亚硝酸盐降解率。Kong 等^[25]以乳酸菌作为发酵剂对芥菜进行发酵研究，结果同样表明乳酸菌可显著降低亚硝酸盐含量。

2.2.5 菌株协同性分析

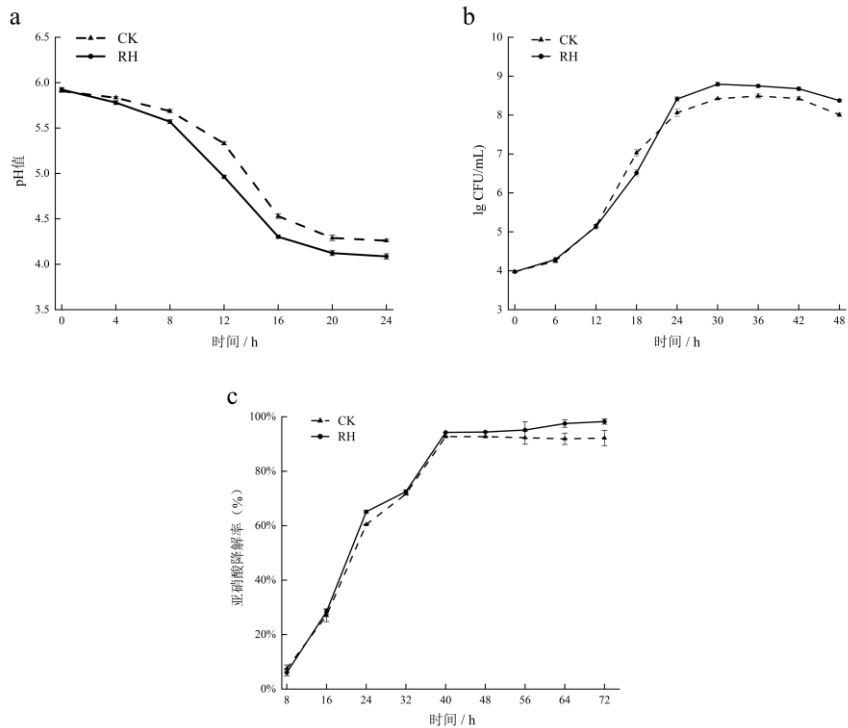


图 6 单菌培养及共培养体系中 pH 值、乳酸菌菌落总数与亚硝酸钠降解率的变化

Fig.6 Changes in pH, total lactic acid bacteria colony count, and sodium nitrite degradation rate in single-culture and co-culture systems

注：图 a 为体系 pH 值变化趋势，图 b 为体系乳酸菌总数变化趋势，图 c 为体系亚硝酸盐降解率变化趋势。

清酒乳杆菌 2-Y4-2 单培养（CK 组）和与红曲菌 2SH 共培养（RH 组）过程中发酵液 pH 值变化情况如图 6a 所示，前 4 h 内，两组 pH 值无显著变化，在 4~16 h 时，RH 组 pH 值快速下降至 4.3，16 h 后 CK 组和 RH 组的

pH 值分别稳定在 4.26 和 4.08 左右。这一结果表明 RH 组的产酸能力强，有利于快速营造酸性发酵环境。可能原因是红曲菌能够消耗乳酸菌代谢产物，缓解反馈抑制，进而加速体系酸化进程^[26]。两组中乳酸菌总数均呈现典型的 S 型曲线，其中 RH 组稳定期乳酸菌总数比 CK 组提高了 6.1%，这一结果表明红曲菌与乳酸菌的共培养能够增加乳酸菌的发酵优势。亚硝酸盐降解率的变化如图 6c 所示，48 h 前两组降解率无显著差异，随着发酵时间延长共 RH 组的降解率开始显著提高，最终稳定在 97.39%，与 CK 组相比提高 5.04%，Huang 等^[27]的研究也证实乳酸菌与红曲菌的组合使发酵体系亚硝酸盐残留量降低至 0.15 mg kg⁻¹，这一结果进一步证明了红曲菌与乳酸菌协同发酵的优越性。

2.3 发酵香肠理化性质分析

2.3.1 复合组香肠桔霉素测定

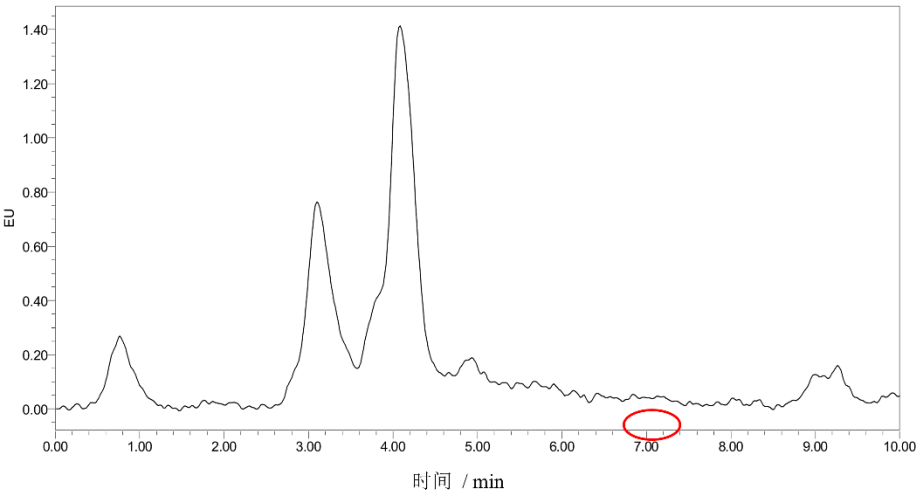


图 7 香肠中桔霉素检测色谱图

Fig.7 Chromatogram of naringenin detection in sausage

桔霉素的合成受菌株自身因素的影响，同时也与发酵环境密切相关。香肠样品中桔霉素的测定结果显示 7 min 处未出现特征色谱峰，表明红曲菌 2SH 并未因发酵环境条件的改变而产生桔霉素，进一步证实该菌株具有较高的安全性，可以应用于本香肠。

2.3.2 微生物指标分析

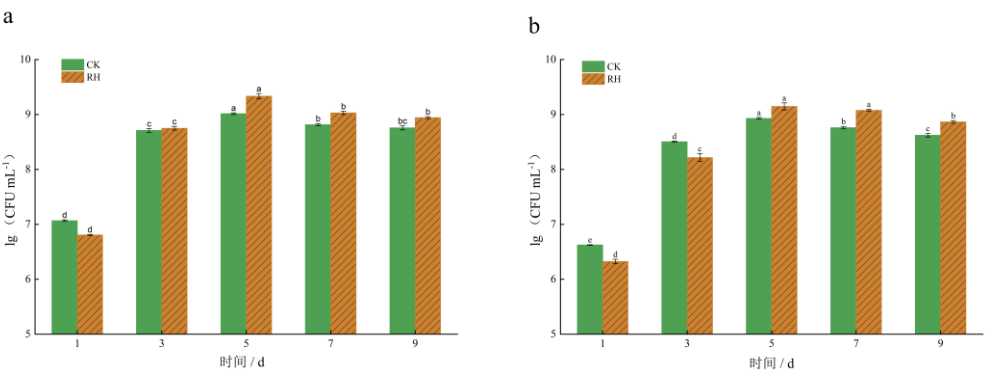


图 8 不同接种方式对发酵香肠总菌落数与乳酸菌总数的影响

Fig.8 Effect of Different Inoculation Methods on Total Bacterial Count and Total Lactic Acid Bacteria Count in Fermented Sausage

注：图 a 为香肠中总菌落数，图 b 为香肠中乳酸菌总数。图中不同小写字母表示不同时间组内显著性差异（ $P<0.05$ ）。对两组样品中的乳酸菌和菌落总数进行统计，结果如图 8 所示。随着发酵时间的延长，香肠中乳酸菌和菌落总数整体呈现先上升后降低趋势。由于 RH 组添加了红曲菌并降低了清酒乳杆菌接种量，而红曲菌初期生长速率较慢，因此在发酵初期 CK 组乳酸菌总数和菌落总数均高于 RH 组；发酵 1~5 d 阶段红曲菌进入对数生长期，菌

体数量快速上升,且之前试验已证实两菌具有协同作用,可以促进清酒乳杆菌大量繁殖,发酵5 d时RH组乳酸菌总数和菌落总数反超CK组;发酵5~9 d,两组香肠乳酸菌总数和菌落总数均呈缓慢下降趋势。这可能由于营养物质的持续消耗,导致体系内微生物间激烈的生态位竞争,这一过程虽然导致了菌群数量的衰退,但实际上是发酵体系向稳定期过渡的演替,是确保香肠最终风味、安全性及品质稳定的关键生物因素^[28];发酵结束时RH组样品的菌落总数和乳酸菌数显著高于CK组,稳定在 $8.94 \log \text{CFU/g}$ 、 $8.86 \log \text{CFU/g}$,这与张月等^[29]关于植物乳杆菌和戊糖片球菌共发酵香肠后乳酸菌总数显著高于单菌发酵的研究结果相似。此外,这一结果也与RH组pH值在前24 h内快速下降高度吻合,添加红曲菌后提高了香肠的乳酸菌总数,增加乳酸产出,从而降低了体系pH值。

2.3.3 水分活度和水分含量分析

水分活度(A_w)与水分含量是评价肉制品品质、安全性和稳定性的关键指标,较低的水分活度有利于发酵香肠的货架寿命。由图9所知,水分活度(图9a)与水分含量(图9b)在整个香肠发酵期间均呈明显下降趋势,Maria等^[30]在研究中同样报道了该现象。在0~5 d内RH组两个指标分别为31.07%和0.853,比CK组下降更为显著,其中水分含量的下降可能是微生物的增殖消耗水分及乳酸菌产酸导致体系pH值下降,较低的pH值环境使肌原纤维蛋白发生变性、凝聚,导致其持水能力减弱。发酵第9 d时RH组与CK组的水分含量基本相同,稳定在27.07%左右,此时RH组的水分活度显著低于CK组。

2.3.4 pH值和亚硝酸盐含量分析

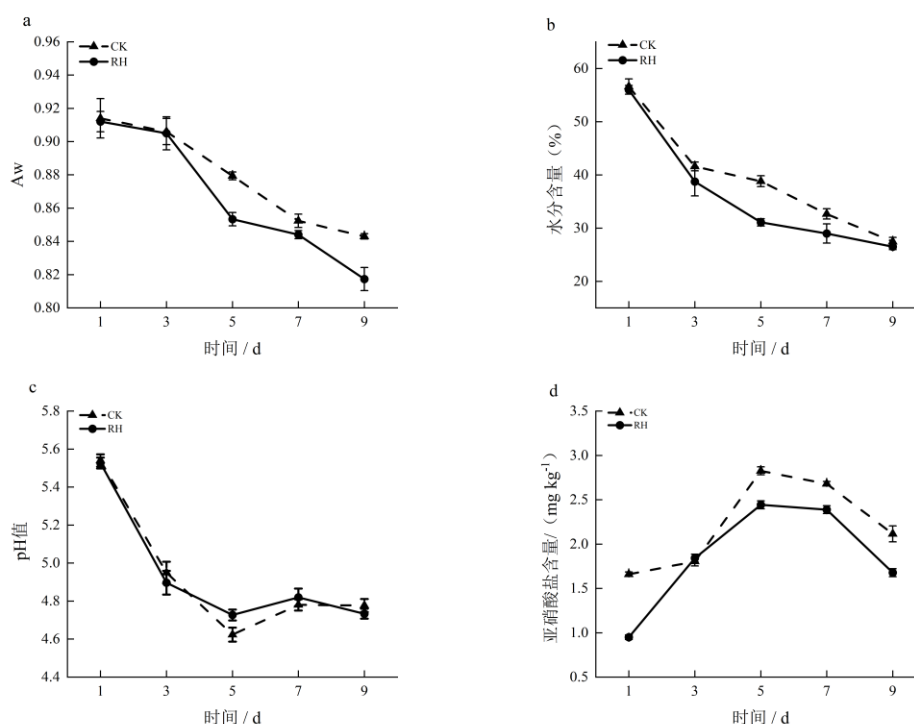


图9 香肠发酵过程中不同指标变化分

Fig.9 Analysis of changes in various parameters during sausage fermentation

注: 图a为 A_w 变化趋势,图b为水分含量变化趋势,图c为pH值变化趋势,图d为亚硝酸盐含量变化趋势。

香肠发酵过程中pH值的变化如图9c所示,发酵过程中两组样品pH值均呈先下降后升高的趋势。发酵1~5 d,由于清酒乳杆菌的产酸作用导致两组香肠pH值快速降低,与对照组相比,添加红曲菌的RH组pH值略微较高,在第5 d时为4.72。这可能时由于CK组清酒乳杆菌接种量高于RH组,导致有机酸积累,这也与发酵前期CK组乳酸菌总量显著高于RH组的结果相互印证。发酵5 d之后两组香肠pH值出现缓慢升高后趋于平稳,这可能与微生物代谢或酶促反应有关,蛋白质被分解生成游离氨基酸、胺类等碱性物质,从而提高体系pH值。Ji等^[31]研究结果也表明随着香肠发酵的进行,糖类物质的消耗和乳酸积累产生的反馈抑制导致pH值下降速度减缓,最终稳定在4.8~5.2之间。

香肠发酵过程中亚硝酸盐含量的检测结果如图9d所示,两组香肠中亚硝酸盐含量均呈先上升后下降的趋势,在1~5 d内香肠亚硝酸盐含量持续上升,第5 d时达到峰值,RH组和CK组含量分别为2.44和2.82 mg kg^{-1} ,在

5~9 d 内亚硝酸盐含量开始下降, 发酵结束后 RH 组亚硝酸盐含量为 1.67 mg kg⁻¹, 相比于 CK 组降低了 24.19%。发酵初期香肠体系的 pH 值相对较高, 有利于硝酸还原酶的活性, 促进了硝酸盐向亚硝酸盐的转化^[32], 导致了亚硝酸盐含量的升高, 随着香肠发酵的进行, 乳酸菌产酸导致 pH 值迅速下降, 较低的 pH 值环境加速亚硝酸盐的分解消耗。GB 2760-2024《食品添加剂使用标准》中规定香肠中亚硝酸盐含量应小于 30 mg kg⁻¹, 两组香肠均符合标准的要求。

2.3.5 香肠色泽分析

香肠发酵过程中样品的色泽分析结果由表 1 所示。两组发酵香肠的亮度值 *L**在发酵期间均呈下降趋势, 发酵结束后 RH 组 *L**显著低于 CK 组, 研究表明^[33]香肠成熟过程中水分含量的降低会影响香肠表面对光线的折射能力, 导致 *L**值下降; 整个发酵过程 RH 组的红度值 *a**均显著高于 CK 组, 这可能是红曲菌次级代谢产物红曲色素引起 *a**的升高。两个样品黄度值 *b**在发酵过程中均呈先上升后下降的趋势, 发酵 5 d 时达最大值, 发酵结束时两组香肠 *b**没有显著性差异。

表 1 发酵香肠在发酵过程中色差的变化

Table 1 Changes in color and texture of the two groups of fermented sausages during the fermentation process

项目	分组	时间/d				
		1	3	5	7	9
<i>L</i> *	CK	51.67±4.80 ^a	48.3±3.23 ^a	47.01±2.77 ^a	42.35±1.43 ^a	40.41±2.80 ^a
	RH	40.35±1.51 ^b	43.92±2.25 ^b	36.74±3.34 ^c	34.75±1.27 ^c	32.9±0.84 ^b
<i>a</i> *	CK	8.03±0.91 ^b	8.05±1.22 ^b	6.96±1.15 ^b	5.73±0.44 ^b	6.74±1.46 ^b
	RH	15.34±1.12 ^a	14.83±0.69 ^a	14.28±0.67 ^a	13.91±1.24 ^a	13.83±1.47 ^a
<i>b</i> *	CK	12.6±2.18 ^a	15.44±1.35 ^a	19.75±2.22 ^a	15.79±2.10 ^a	12.91±1.70 ^a
	RH	9.55±1.21 ^b	11.36±0.99 ^b	12.07±1.46 ^b	10.8±1.66 ^b	10.61±1.44 ^a

注: 不同的小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)。下表同。

2.3.6 香肠质构分析

香肠成熟过程中, 质构是衡量干发酵肉制品口感和咀嚼力的重要指标, 是一个重要的香肠品质与成熟参数, 决定着消费者对产品的选。由表 2 可知, 香肠的硬度随着发酵时间逐渐增大, 发酵到第 3 d 时, CK 组硬度显著高于 RH 组, 这是因为低 pH 促使溶解的纤维蛋白聚集, 形成有序的蛋白质网络, 从而导致硬度增加^[34]。发酵结束后, 两组香肠硬度不存在显著性差异 ($P>0.05$); 香肠的弹性随着发酵时间逐渐降低, 但整体发酵期间 RH 组与 CK 组相比没有显著性差异 ($P>0.05$)。

表 2 发酵香肠在发酵过程中质构的变化

Table 2 Changes in the Texture of Fermented Sausage During the Fermentation Process

项目	分组	时间/d				
		1	3	5	7	9
硬度	CK	7.05±0.24 ^a	25.93±1.07 ^a	36.54±0.74 ^a	61.99±9.68 ^a	66.33±7.01 ^b
	RH	4.90±0.05 ^a	14.00±1.68 ^b	31.46±7.82 ^a	42.53±4.55 ^a	64.83±6.99 ^b
弹性	CK	47.25±0.62 ^a	45.89±0.46 ^a	44.7±0.75 ^a	42.45±0.77 ^a	41.01±1.33 ^a
	RH	48.49±0.73 ^a	46.49±0.22 ^a	45.79±0.84 ^a	43.39±0.80 ^a	42.79±1.37 ^a

2.3.7 风味物质分析

发酵香肠中的挥发性化合物主要来自脂质氧化、微生物代谢、碳水化合物与氨基酸的分解, 以及制备过程中添加的酒与香料等^[35]。为深入解析红曲菌发酵对香肠风味物质的影响, 采用 HS-SPME-GC-MS 对两组香肠中风味物质进行了测定, 结果如表 3 所示。两组样品中共检测出了 46 种风味物质, 其中种醛类 8 种、酮类 9 种、醇类 8 种、酸类 5 种、酯类 15 种及吡嗪类 1 种, 对比两组样品各物质的相对含量可以看出, 红曲菌发酵显著提升了香肠的风味物质总量。成分分析显示, 酯类物质种类在各组占主导地位, 并以乙酸乙酯为主 (1 801.06 μg kg⁻¹) 赋予香肠浓郁的果香^[36], 但该物质两组之间没有显著差异。其余酯类物质如丁二酸二甲酯、丁酸丙酯、苯甲酸乙酯经发酵后显著上升 ($P<0.05$); 醇类物质分析表明, 红曲菌添加增加了 2-辛醇、2,3-丁二醇、异戊烯醇、1-壬醇、3-

辛醇、2-甲基-1-戊烯-3-醇，其中异戊烯醇和 1-壬醇相对气味活度值高具有清新的花香和橙香^[37]。此外，2-辛烯-1-醇、2,3-丁二醇源于脂质的氧化，具有独特玫瑰香气；在两组香肠中共检测出 5 种酸类物质，而接种红曲菌的香肠酸类物质总含量较高，尤其是己酸、辛酸、壬酸，这表明红曲菌的接种可能会提高发酵香肠的总酸含量；醛类（癸醛、2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛）具有低阈值的特点，赋予产品青草、油脂及脂香气息；2-壬烯醛提供青香与果香，为香肠提供香甜风味；(E)-2-辛烯醛呈现浓郁的青草香，有助于增强香气的层次感。尤其是 RH 组该物质含量均高于 CK 组，是发酵香肠香气的关键贡献者^[38]；酮类化合物中，仅(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮的 OAV 值相对较高，且 RH 组中的含量显著高于 CK 组，对香肠的风味起着重要作用^[39]。吡嗪是香肠中唯一的吡嗪类物质，呈现典型的清淡坚果香。但与 CK 组相比，红曲菌的加入显著降低了其含量。

表 3 风味物质含量及气味活性值分析结果

Table 3 Analysis Results of Flavor Compound Content and Odor Activity Values

编号	风味物质	相对含量/($\mu\text{g kg}^{-1}$)		相对气味活度值	
		RH	CK	RH	CK
V1	2-辛醇	702.74 $\pm$ 9.64 ^a	574.62 $\pm$ 19.21 ^b	9.64	8.04
V2	2,3-丁二醇	643.65 $\pm$ 9.29 ^a	346.22 $\pm$ 6.71 ^b	<1	<1
V3	异戊烯醇	508.41 $\pm$ 10.08 ^a	184.92 $\pm$ 2.97 ^b	2.08	<1
V4	1-壬醇	460.38 $\pm$ 12.70 ^a	271.55 $\pm$ 5.08 ^b	7.96	9.26
V5	2-辛烯-1-醇	407.30 $\pm$ 7.10 ^b	462.81 $\pm$ 14.52 ^a	<1	<1
V6	3-辛醇	48.50 $\pm$ 0.70 ^a	41.43 $\pm$ 1.53 ^b	<1	<1
V7	1-庚烯-3-醇	8.75 $\pm$ 0.18 ^b	9.71 $\pm$ 0.14 ^a	9.64	8.04
V8	2-甲基-1-戊烯-3-醇	104.66 $\pm$ 3.64 ^a	52.99 $\pm$ 1.65 ^b	<1	<1
V9	(E,E)-2,4-辛二烯醛	745.40 $\pm$ 19.02 ^a	780.79 $\pm$ 25.10 ^a	5.13	5.83
V10	(E)-4-庚烯醛	32.52 $\pm$ 1.94 ^a	29.71 $\pm$ 0.93 ^a	<1	<1
V11	顺-9-十六碳烯醛	26.70 $\pm$ 1.28 ^b	30.42 $\pm$ 1.58 ^a	ND	ND
V12	癸醛	11.90 $\pm$ 0.19 ^a	9.50 $\pm$ 0.29 ^b	116.35	95.16
V13	(E)-2-癸烯醛	13.95 $\pm$ 0.42 ^b	18.89 $\pm$ 0.53 ^a	2.79	3.78
V14	2-壬烯醛	54.38 $\pm$ 1.40 ^a	47.65 $\pm$ 0.85 ^b	544.36	465.93
V15	(E)-2-辛烯醛	270.16 $\pm$ 6.74 ^a	234.90 $\pm$ 4.71 ^b	90.189 51	80.501 59
V16	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	17.05 $\pm$ 0.23 ^a	7.49 $\pm$ 0.22 ^b	1 673.48	744.20
V17	1-甲基哌啶-2-甲酸乙酯	186.08 $\pm$ 2.75 ^a	174.52 $\pm$ 2.74 ^b	ND	ND
V18	十六烷酸甲酯	1 736.45 $\pm$ 92.54 ^a	799.21 $\pm$ 38.23 ^b	<1	<1
V19	乙酸己酯	1 801.06 $\pm$ 45.78 ^a	1 791.13 $\pm$ 86.99 ^a	15.11	15.54
V20	3-甲基丁酸-3-甲基丁酯	257.81 $\pm$ 12.85 ^b	293.49 $\pm$ 9.05 ^a	<1	<1
V21	苯乙硫代酸-S-甲酯	885.36 $\pm$ 46.15 ^b	1 179.49 $\pm$ 62.95 ^a	ND	ND
V22	3-甲基丁酸乙酯	72.56 $\pm$ 1.08 ^b	80.27 $\pm$ 2.34 ^a	710.31	804.91
V23	丁二酸二甲酯	16.91 $\pm$ 0.43 ^a	13.12 $\pm$ 0.39 ^b	5.05	3.89
V24	顺式-3-己烯醇当归酸酯	29.52 $\pm$ 0.53 ^b	34.87 $\pm$ 0.89 ^a	ND	ND
V25	外-2-羟基桉叶素乙酸酯	10.45 $\pm$ 0.17 ^b	12.66 $\pm$ 0.36 ^a	ND	ND
V26	丁酸丙酯	125.54 $\pm$ 3.59 ^a	117.19 $\pm$ 1.88 ^b	6.94	6.37
V27	十二烷酸乙酯	56.41 $\pm$ 1.13 ^a	53.43 $\pm$ 1.40 ^a	<1	<1
V28	苯甲酸乙酯	44.02 $\pm$ 0.86 ^a	36.40 $\pm$ 0.64 ^b	<1	<1
V29	苯乙酸乙酯	12.92 $\pm$ 0.42 ^b	14.13 $\pm$ 0.29 ^a	<1	<1
V30	正辛酸异丁酯	7.28 $\pm$ 0.15 ^b	8.26 $\pm$ 0.20 ^a	ND	ND
V31	乙酸-2-氟-3-吡啶醇酯	6.11 $\pm$ 0.22 ^b	6.88 $\pm$ 0.26 ^a	ND	ND
V32	己酸	449.23 $\pm$ 5.06 ^a	414.15 $\pm$ 7.28 ^b	<1	<1
V33	辛酸	339.96 $\pm$ 8.44 ^a	247.40 $\pm$ 3.42 ^b	<1	<1

V34	壬酸	129.76±3.60 ^a	97.72±1.03 ^b	80.83	61.98
V35	7-辛烯酸	20.60±0.36 ^b	26.74±0.63 ^a	ND	ND
V36	2-己烯酸	9.15±0.18 ^b	9.84±0.17 ^a	ND	ND
V37	6-甲基-2(1H)-吡啶酮	8.89±0.25 ^b	11.67±0.37 ^a	ND	ND
V38	5-甲基-4-庚烯-3-酮	157.60±3.46 ^b	174.91±3.93 ^a	ND	ND
V39	3-甲基环己酮	14.88±0.75 ^a	14.15±0.43 ^a	<1	<1
V40	1,1,4a-三甲基-3,4,4a,5,6,7-六氢-2(1H)-萘酮	32.17±0.53 ^a	12.20±0.17 ^b	<1	<1
V41	2,5-辛二酮	131.48±3.86 ^a	94.08±1.43 ^b	ND	ND
V42	1-(2-甲基苯基)乙酮	12.27±0.21 ^b	13.39±0.21 ^a	ND	ND
V43	3,5-辛二烯-2-酮	40.84±0.49 ^b	45.71±0.99 ^a	ND	ND
V44	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	36.73±0.90 ^a	24.43±0.44 ^b	73.16	49.93
V45	6,10-二甲基-3,5,9-十一碳三烯-2-酮	10.46±0.18 ^b	17.72±0.28 ^a	<1	<1
V46	吡嗪	363.28±10.26 ^b	459.76±13.48 ^a	<1	1.15

2.4 香肠中理化性质与关键风味化合物相关性分析

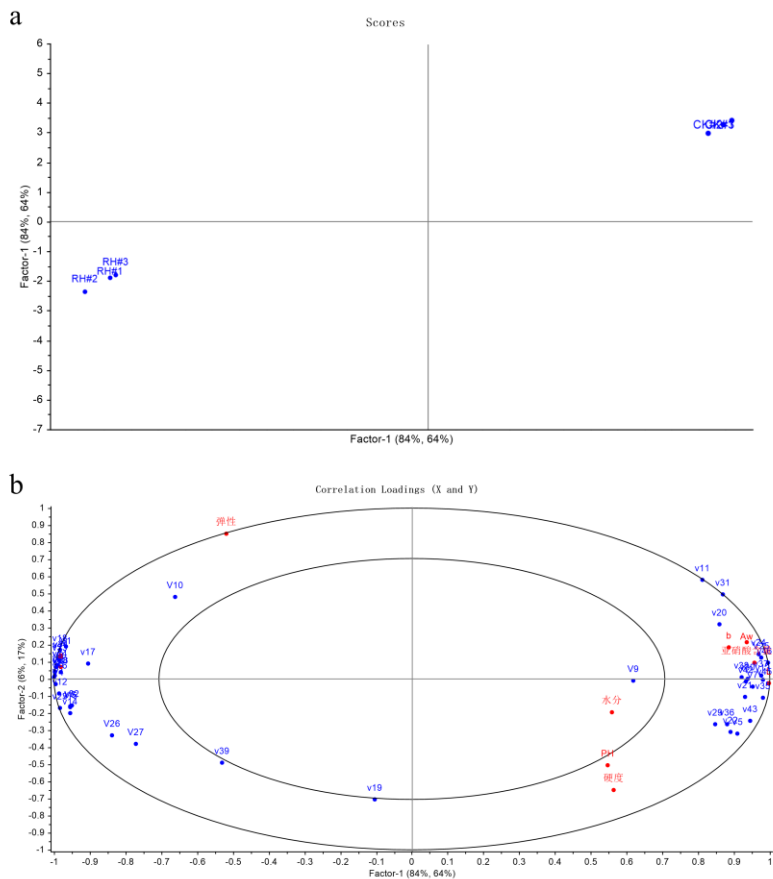


图 10 发酵香肠风味物质与香肠基本性质 PLSR 分析

Fig.10 PLSR analysis of flavor compounds in fermented sausages versus their basic properties

注：图 a 为得分图，图 b 为载荷图。

采用偏最小二乘回归（PLSR）分析发酵香肠中风味物质与基本理化性质的相关性，以不同发酵处理组为自变量，风味物质及 pH 值、水分活度、亚硝酸盐含量、质构等理化指标为因变量构建模型。图 10 模型结果显示，主成分 PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 84%和 64%，PLSR 载荷图中最外层与次外层椭圆分别代表 $r^2=1.0$ 与 $r^2=0.5$ 的解释范围，绝大多数风味物质与理化指标均落于两椭圆内，表明该模型对变量的解释度较高，拟合效果良好。其中 CK 组与 L^* 、 b^* 、 A_w 、亚硝酸盐呈显著正相关，RH 组与 a^* 值呈显著正相关，表明红曲菌的添加可以促进

香肠发色。风味物质分布显示,大部分风味化合物聚集于载荷图的左侧与 RH 组呈正相关,如酸类物质己酸、辛酸、壬酸,醇类物质 2,3-丁二醇、1-壬醇,酯类物质,癸醛、2-壬烯醛、乙酸己酯等,该结果与风味物质相对含量检测结果相一致,这一现象表明红曲菌的引入能够显著提升香肠关键特征风味物质的积累水平。

3 结论

本研究将从红曲米和传统发酵香肠中分离得到不产桔霉素的红曲菌 2SH 和清酒乳杆菌 2-Y4-2 作为对象,探究其生长特性及在香肠发酵中的应用,探索红曲菌提升发酵香肠品质及风味的作用;研究发现菌株 2SH 和 2-Y4-2 具有较强的耐酸性和耐盐能力,可在 pH 值 3.0,盐浓度 6%环境正常生长。还展现出高效的亚硝酸盐降解能力(降解率均高于 92.00%),表明具备肉制品发酵应用潜力;本研究通过制备红曲菌与清酒乳杆菌复合发酵剂,系统分析红曲菌对发酵香肠微生物群落、理化性质、色泽、质构及挥发性风味的影响,并通过 PLSR 模型解析菌株与风味物质和理化指标的相关性。结果表明:两菌株存在明显协同作用,添加红曲菌可提升发酵香肠乳酸菌数量和红度值 a^* ,加快前期发酵产酸、脱水及 A_w 含量,抑制了杂菌的生长。相较单一清酒乳杆菌发酵复合发酵可有效降低亚硝酸盐残留 24.19%,表明接种红曲菌可提升产品安全性,且发酵成熟后两组质构无明显区别,说明红曲菌复配仅改善发色而不破坏咀嚼口感。挥发性风味物质共检出 46 种,红曲菌发酵可显著提升酸类、醇类、醛类、酮类低阈值香气物质,赋予香肠果香、青草香等丰富层次,仅吡嗪类坚果风味物质略有下降,该规律与 PLSR 载荷分析结果相互印证,模型直观反映了红曲菌与大部分特征风味、红度值 a^* 等指标显著正相关。对比清酒乳杆菌单菌发酵,复合发酵提高了产品的安全指标、色泽与风味。这些结果对红曲菌在发酵香肠中的应用具有重要意义,后续可进一步探究红曲菌促进清酒乳杆菌生长的机制及发酵香肠中亚硝酸盐降解机制,为红曲菌在发酵食品中的应用奠定理论基础。

参考文献

- [1] JANSSEN D, EISENBACH L, EHRMANN M A, et al. Assertiveness of *Lactobacillus sakei* and *Lactobacillus curvatus* in a fermented sausage model [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 285: 188-197.
- [2] WANG J, AZIZ T, BAI R, et al. Dynamic change of bacterial diversity, metabolic pathways, and flavor during ripening of the Chinese fermented sausage [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 990606.
- [3] ZHANG Q, SHEN J, MENG G, et al. Selection of yeast strains in naturally fermented cured meat as promising starter cultures for fermented cured beef, a traditional fermented meat product of northern China [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(2): 883-891.
- [4] XU H, LI D, JIANG X, et al. Screening of lactic acid bacteria isolated from fermented cowpea and optimization of biomass production conditions [J]. Foods, 2025, 14(2): 150.
- [5] PORTO-FETT A C S, ESPUÑA E, SHANE L E, et al. Viability of shiga toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., and *Listeria monocytogenes* during preparation and storage of fuet, a traditional dry-cured spanish pork sausage [J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(5): 879-889.
- [6] GAWBORISUT S, MUENGKRATOK S. Red yeast rice and optimal fermentation periods improve the quality of esan fermented fish sausage [J]. International Journal of Food Science, 2024, 2024(1): 4831279.
- [7] AMEER A, SELESHE S, KIM B J, et al. Inoculation of *Lactobacillus sakei* on quality traits of dry fermented sausages [J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2021, 26(4): 476-484.
- [8] JANSSEN D, DWORSCHAK L, LUDWIG C, et al. Interspecies assertiveness of *Lactobacillus curvatus* and *Lactobacillus sakei* in sausage fermentations [J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 331: 108689.
- [9] SINZ Q, FREIDING S, VOGEL R F, et al. A hydrolase from *Lactobacillus sakei* moonlights as a transaminase [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(7): 2284-2293.
- [10] YU X, WU H, ZHANG J. Effect of *Monascus* as a nitrite substitute on color, lipid oxidation, and proteolysis of fermented meat mince [J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(2): 575-581.
- [11] LIU Z Y, ZHANG M L, LI Z H, et al. Fermentation of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi and the characteristics of fermented bighead carp surimi products [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(3): 511-516.

- [12] GONG Z, WU Z, YANG Q, et al. Influences of *lactic acid bacteria* strains on the flavor profiles, metabolites and quality characteristics of red yeast rice produced by solid-state fermentation [J]. Food Research International, 2024, 197: 115172.
- [13] GB 5009-33-2016. 食品安全国家标准食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S].
- [14] KANG S N, YIM D. Effects of individual and combined doses of added nitrite and nitrate on the quality of dry-fermented sausage [J]. Animal Bioscience, 2025, 38(6): 1272-1278.
- [15] SARIÇOBAN C, UNAL K. Influence of pre-treated bitter orange albedo on the physicochemical, textural and sensory properties of fermented sausages (sucuk) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(4): 1478-1486.
- [16] HUANG W, FANG S, WANG J, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.
- [17] OSTRY V, MALIR F, RUPRICH J. Producers and important dietary sources of ochratoxin a and citrinin [J]. Toxins, 2013, 5(9): 1574-1586.
- [18] SHEN T, YE P, ZHOU Q, et al. Purification, characterization, and mode of action of sakacin ZFM225, a novel bacteriocin from *Lactobacillus sakei* ZFM225 [J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2023, 35: 101494.
- [19] 董钰鑫,陈莎,高梦祥,等. pH 对红色红曲菌(*Monascus ruber*)M7 生长及产孢的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(3): 76-80.
- [20] 周珂. 红曲菌 ZH2 高产橙黄色素低产桔霉素的液态发酵研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [21] 张娜娜, 申沛琦, 杨欣, 等. 高产 *Monacolin K* 的杂粮红曲发酵工艺研究及其品质评价[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(11): 30-36.
- [22] DEVANTHI I P V P, GKATZIONIS K. Soy sauce fermentation: microorganisms, aroma formation, and process modification [J]. Food Research International, 2019, 120: 364-374.
- [23] TANG D R, LI C L, XU Z Y, et al. hOGG1: A novel mediator in nitrosamine-induced esophageal tumorigenesis [J]. Food and Chemical Toxicology, 2024, 187: 114550.
- [24] 刘奇, 赵婵娟, 谭显鑫, 等. 渝东北低硝腊肉中亚硝酸盐降解菌的分离鉴定及工艺优化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 101-111.
- [25] KONG X, ZHANG J, SHEN H, et al. Screening, identification, and fermentation characteristics of lactic acid bacteria from pickled potherb mustard and potential application [J]. Foods, 2025, 14(8): 1431.
- [26] ZHANG S, SHU M, GONG Z, et al. Enhancing extracellular *Monascus* pigment production in submerged fermentation with engineered microbial consortia [J]. Food Microbiology, 2024, 121: 104499.
- [27] HUANG L, ZENG X, SUN Z, et al. Production of a safe cured meat with low residual nitrite using nitrite substitutes [J]. Meat Science, 2020, 162: 108027.
- [28] SALLAN S, YILMAZ ORAL Z F, KAYA M. A review on the role of lactic acid bacteria in the formation and reduction of volatile nitrosamines in fermented sausages [J]. Foods, 2023, 12(4): 702.
- [29] 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.
- [30] STEGMAYER M Á, SIRINI N E, RUIZ M J, et al. Effects of lactic acid bacteria and coagulase-negative staphylococci on dry-fermented sausage quality and safety: systematic review and meta-analysis [J]. Meat Science, 2023, 206: 109337.
- [31] WOLDEMARIAM K Y, CAI M, JIAO Y, et al. Impact of lactic acid bacteria on the flavor profile of salami and role of microbial diversity and functional gene [J]. Journal of Food Biochemistry, 2024, 2024(1): 6073261.
- [32] JI L, ZHOU C, NING J WEN, et al. Nitrite-reducing performance of two *Lactobacillus* strains isolated from traditional Sichuan fermented sausage in different production processes [J]. Food Bioengineering, 2022, 1(3-4): 307-318.
- [33] SKALJAC S, JOKANOVIĆ M, TOMOVIC V, et al. Colour characteristics of vacuum packed fermented sausage during storage [C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, 333(1): 012101.
- [34] IKONIĆ P, JOKANOVIĆ M, PETROVIĆ L, et al. Effect of starter culture addition and processing method on proteolysis and texture profile of traditional dry-fermented sausage petrovsk áklob áa [J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(9): 1924-1937.
- [35] ŞİMŞEK D, YILMAZ ORAL Z F, JABERI R, et al. Partial replacement of NaCl by KCl, MgCl₂ and CaCl₂ chloride salts in the production of sucuk: effects on volatile compounds, lipid oxidation, microbiological and sensory properties [J]. Foods, 2023, 12(19): 3525.
- [36] KAYA M, KABAN G. Volatile compounds of sucuk, a dry fermented sausage: the effects of ripening rate, autochthonous starter cultures and fat type [J]. Foods, 2024, 13(23): 3839.
- [37] GUO S, WANG D, LI Y, et al. Comparison of aroma profiles of whiskeys fermented from different grain ingredients [J]. Foods, 2024,

13(13): 2031.

- [38] LUO K K, KIM D A, MITCHELL-SILBAUGH K C, et al. Comparison of amygdalin and benzaldehyde levels in California almond (*Prunus dulcis*) varieties [C]// VII International Symposium on Almonds and Pistachios 1219. 2017: 1-8.
- [39] SHAN K, YAO Y, WANG J, et al. Effect of probiotic *Bacillus cereus* DM423 on the flavor formation of fermented sausage [J]. Food Research International, 2023, 172: 113210.