王盼, 李林峰, 黄文艺, 等. 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元特性及其在冷藏杜黑猪肉保鲜中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 238−247. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020042
WANG Pan, LI Linfeng, HUANG Wenyi, et al. Characteristics of Postbiotics *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 and Its Application in the Preservation of Refrigerated Duhei Pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 238−247. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020042

· 生物工程 ·

副干酪乳杆菌 Lab5 后生元特性及其在冷藏杜黑猪肉保鲜中的应用

王　盼[1], 李林峰[2], 黄文艺[1], 吴艳丽[1], 张浩峰[1], 刘小容[1], 胡文锋[3], 胡　斌[4,*], 李雪玲[1,*]
（1.华南农业大学食品学院, 广东广州 510642;
2.华南农业大学动物科学学院, 广东广州 510642;
3.生物源生物技术（深圳）股份有限公司, 广东深圳 518118;
4.广东省农业科学院动物科学研究所/猪禽种业国家重点实验室/广东省动物育种与营养重点实验室, 广东广州 510640）

摘　要: 本研究拟筛选对单增李斯特菌具有显著抑制作用的乳酸菌，探究乳酸菌抑菌物质的分布、热稳定性、pH 稳定性、蛋白酶敏感性；测定该乳酸菌生长曲线及最小抑菌浓度。最后初步应用于杜黑猪肉冷藏保鲜，通过感官评价、pH、肉色、菌落总数、总挥发性盐基氮和硫代巴比妥酸值评价其保鲜效果。结果表明，来源于泡菜汁中一株副干酪乳杆菌 Lab5 对单增李斯特菌的抑制效果显著，抑菌圈直径达 38.28±1.97 mm，抑菌物质存在于发酵上清液（CFS）中，CFS 经 60~121 ℃ 处理 25 min，其对单增李斯特菌和大肠杆菌抑菌圈直径分别超过 32.07±2.1 mm、11.53±0.44 mm；pH3.0~8.0 范围内抑菌活性无显著性差异（P>0.05）；蛋白酶 K 处理对抑菌活性影响最大，其对单增李斯特菌抑菌圈直径减小了 7.69 mm；表明副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 具有良好的热稳定性、pH 稳定性，对六种蛋白酶（糜蛋白酶、胰蛋白酶、肠激酶、蛋白酶 K、木瓜蛋白酶、胃蛋白酶）较不敏感。在应用于杜黑猪肉冷藏保鲜发现，副干酪乳杆菌 Lab5 后生元处理组（2MIC 和 4MIC 组）与对照组相比，冷藏 9 d 时肉品的菌落总数显著降低了 99.7%，pH 下降了 0.33，硫代巴比妥酸反应物分别减少 0.66 mg/kg、0.91 mg/kg（P<0.05）；延长了货架期 2 d。感官评分也表明其起到护色、改善气味的作用，延缓猪肉感官质量的下降。特别是 4MIC 后生元组在各项保鲜指标显示出更好的保鲜效果。以上研究结果表明，副干酪乳杆菌 Lab5 株后生元成分作为一种新型天然、安全的生物防腐剂，在肉类保鲜领域具有重要的应用潜力，对提升食品安全具有重要的理论和实际意义。

关键词: 副干酪乳杆菌 Lab5, 后生元, 单增李斯特菌, 杜黑猪肉, 保鲜
中图分类号: TS205.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0238−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020042
本文网刊:

Characteristics of Postbiotics *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 and Its Application in the Preservation of Refrigerated Duhei Pork

WANG Pan[1], LI Linfeng[2], HUANG Wenyi[1], WU Yanli[1], ZHANG Haofeng[1], LIU Xiaorong[1], HU Wenfeng[3], HU Bin[4,*], LI Xueling[1,*]
（1.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2.College of Animal Science of South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
3.Bioforte Biotechnology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518118, China;
4.Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Swine and Poultry Breeding Industry/Guangdong Key Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Guangzhou 510640, China）

收稿日期: 2025−02−08
基金项目: 广东省科技计划项目资助（2022B0202110001）; 华南农业大学校企合作横向项目“畜禽微生物资源发掘、评鉴与应用”（H230386）。
作者简介: 王盼（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品质研究、应用微生物, E-mail: wangpan2968043755@163.com。
*** 通信作者:** 胡斌（1982−）, 男, 博士, 高级畜牧师, 研究方向: 生猪生产管理与繁殖育种研究, E-mail: husanbo@foxmail.com。
李雪玲（1978−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 应用微生物学, E-mail: lixueling@scau.edu.cn。

Abstract: In this study, the screening of lactic acid bacteria with significant inhibitory effect on *Listeria monocytogenes*. It was determined that the inhibitory substances existed in cell-free fermentation supernatant (CFS), cell pellet or bacterial lysate. The thermal stability, pH stability, and protease sensitivity of the inhibitory substances were investigated. The growth curve and the minimum inhibitory concentration (MIC) of the selected strain were also determined. Finally, the preliminary application was in the cold storage and preservation of Duhei pork. The preservation effect was evaluated by sensory evaluation, pH, meat colour, viable cell counts, total volatile basic-nitrogen (TVB-N) and thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS). The experimental results showed that a strain of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 from pickle juice showed notable inhibition of *Listeria monocytogenes*, with an inhibition zone diameter of 38.28±1.97 mm, the inhibitory substances were present in the CFS, which was treated at 60~121 ℃ for 25 min, and its inhibition zone diameter of inhibition against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* still reached more than 32.07±2.1 mm and 11.53±0.44 mm. No significant difference in bacteriostatic activity in the pH 3.0~8.0 (P>0.05). Proteinase K treatment had the greatest effect on the inhibitory activity, as it reduced the diameter of the circle of inhibition of *Listeria monocytogenes* by 7.69 mm; It was shown that *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 CFS had good thermal、pH stability and was less sensitive to six proteases (chymotrypsin, trypsin, enterokinase, proteinase K, papain, pepsin). In the preservation application of refrigerated Duhei pork, it was found that at 9 d of refrigeration, *Lacticaseibacillus paracase*i Lab5 postbiotics treatment groups (2MIC and 4MIC groups) had significantly reduced the viable cell counts of the meat by 99.7% compared to the control, decreased the pH by 0.33, and reducing TBARS reactants by 0.66 mg/kg, and 0.91 mg/kg in meat (P<0.05), and prolonged the shelf-life by 2 d, when compared with the control group. The scores of sensory testing also indicated that it played a role in color protection, improved the odor and delayed the deterioration of the sensory quality of refrigerated pork. In particular, the 4MIC group showed better effects in all freshness indicators. It's concluded that the postbiotic of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5, as a new type of natural and safe biological preservative, has an important potential for application in the field of meat preservation, which is of great theoretical and practical significance for the enhancement of food safety.

Key words: *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5; postbiotics; *Listeria monocytogenes*; Duhei pork; preservation

后生元（Postbiotics）是指对宿主健康有益的无生命微生物和/或其成分的制剂[1]，其所用的菌株，必须是经过安全评价、证实可供食用的菌种，主要从肠道或发酵食品中分离获得。由于具有抗菌、抗氧化等功能特性，后生元在食品品质改良、保健品、食品脱毒等领域广泛应用[2]。在后生元来源菌株中，副干酪乳杆菌因其显著的抑菌效果而备受关注。研究表明，副干酪乳杆菌发酵上清液（cell-free fermentation supernatant, CFS）对多种真菌（如霉菌、红酵母、白色念珠菌）具有显著抑制作用[3]。副干酪乳杆菌 p6 发酵液对 10 种细菌和 1 种真菌具有抗菌活性，有效延缓饼干中过氧化物值和丙二醛含量的上升[4]。在肉类保鲜方面，副干酪乳杆菌与两种乳酸菌混合液使猪肉中单增李斯特菌数量降低 20%[5]；而菌株 FX-6 的发酵提取物对常见食源性致病菌（金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌）、水产致病菌及霉菌均表现出强抑制作用，将鲜虾货架期从 6 d 延长至 8 d[6]。此外可与其他保鲜技术协同使用大大提升保鲜效果，例如副干酪乳杆菌 H9 与海藻酸钠复合涂膜处理鱼肉，比单独涂抹 H9 菌株延长保鲜期 4 d[7]；Danza 等[8]将副干酪乳杆菌与气调包装、冷藏技术结合，延长了汉堡保质期 4 d。这些研究充分证实，副干酪乳杆菌及其后生元在食品防腐保鲜领域拥有巨大应用潜力。

猪肉是我国居民食用肉类中占比最高且最重要的食用肉类。据统计，约三分之一的肉类因腐败变质而被浪费，造成极大的经济损失[9]。猪肉富含蛋白质和脂肪使其在加工、运输、储存过程中极易因微生物增殖代谢、内源酶催化以及脂肪氧化发生腐败变质[10−11]。普通瘦肉型猪种肌内脂肪含量 2%~3%，而杜黑猪肉作为多元杂交品种（由小耳花猪、莱芜猪、圩猪、湘西黑猪等地方猪种和杜洛克猪经过数十年人工选育而成），其高肌内脂肪含量高达 3%~10%，更易腐败变质[12]。目前肉类保鲜主要为化学防腐保鲜、辐照处理等。这些方法虽有一定的保鲜效果，但存在安全风险且影响肉类品质。因此，开发安全有效的生物保鲜技术具有重要意义。

基于此，本研究从泡菜汁中分离得到一株副干酪乳杆菌 Lab5，研究发现该菌株发酵上清液对低温下仍能生长的致病菌——单增李斯特菌具有显著抑制其生长的作用。通过测定其后生元热稳定性、pH 稳定性、蛋白酶敏感性，及其在杜黑猪肉低温储藏中保鲜效果的应用研究，为解决高脂地方猪肉的保鲜难题提供新思路。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

LB 营养琼脂培养基、MRS 肉汤　广东环凯微生物科技有限公司；胃蛋白酶（1∶3000 U）、肠激酶（5 U/μL）、胰蛋白酶（1∶250 U）、木瓜蛋白酶（800 U/mg）、蛋白酶 K（30 U/mg）、糜蛋白酶（1500 U/mg）　上海麦克林生化科技股份有限公司；杜黑猪肉　广东壹号食品有限公司提供；单增李斯特菌 ATCC 19115（*Listeria monocytogenes*）、大肠杆菌 ATCC 25922

(*Escherichia coli*) 广东省微生物研究所; 乳酸菌保存于华南农业大学食品学院应用微生物实验室, 菌株来源信息如表 1。

表 1 乳酸菌菌株来源信息

Table 1 Source information of lactic acid bacteria strains

编号	菌株	来源
MC2	*Lactococcus lactis* strain 1931乳酸乳球菌	低温选育黑水虻肠道
Lab1	*Pediococcus pentosaceus* strain CAU9541戊糖片球菌	泡菜汁
Lab2	*Lacticaseibacillus casei* strain 4412干酪乳杆菌	泡菜汁
Lab3	*Pediococcus pentosaceus* strain 2397戊糖片球菌	泡菜汁
Lab4	*Pediococcus pentosaceus* strain 4537戊糖片球菌	泡菜汁
Lab5	*Lacticaseibacillus paracasei* strain 4441副干酪乳杆菌	泡菜汁
Lab6	*Lacticaseibacillus paracasei* strain 1835副干酪乳杆菌	泡菜汁
Lab7	*Lacticaseibacillus paracasei* strain 20561副干酪乳杆菌	泡菜汁
Lab8	*Pediococcus acidilactici* strain 4355乳酸片球菌	泡菜汁

FD-1A-50 冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司; K9840 凯氏定氮仪 海能未来技术集团股份有限公司; UV-1100 紫外可见分光光度计 上海美谱达光谱仪器有限公司; SAF-680T 酶标分析仪 上海巴玖实业有限公司; NR60CP3nh 色差仪 深圳市三恩驰科技有限公司; testo205 插入式 pH 计 德图仪表(深圳)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同乳酸菌菌液与其热灭活菌液的抑菌活性 单增李斯特菌作为革兰氏阳性指示菌, 大肠杆菌作为革兰氏阴性指示菌, 制备两种指示菌菌液(10^6 CFU/mL)。乳酸菌菌液的制备: 乳酸菌菌株活化后的菌液以 1% 接种量接种于 50 mL MRS 液体培养基中, 37 ℃ 培养 48 h。热灭活乳酸菌菌液: 以上乳酸菌菌液经 121 ℃ 处理 25 min。

参考 Xu 等[13] 的牛津杯法检测其抑菌活性: 在无菌平皿中倒入 15~20 mL LB 营养琼脂培养基, 静置冷凝。待培养基凝固后, 加入 100 μL(1×10^6 CFU/mL)指示菌菌液, 用灭菌后的涂布棒均匀涂布, 向培养基上放置已灭菌牛津杯, 向牛津杯孔内注入 200 μL 菌液或灭活菌液, 37 ℃ 正立培养 24 h 后测量抑菌圈直径。每个样品至少做两个复孔。

1.2.2 不同组分发酵菌液的制备 热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 菌悬液的制备: 取热灭活菌液, 10000 r/min 离心 15 min, 收集菌体, 并用 PBS 缓冲液(pH7.4)洗涤后于 10000 r/min 离心 15 min, 以洗去培养基, 重复 3 次。将菌体重悬于 PBS 缓冲液至相同体积。副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液的制备: 取热灭活菌液, 于 10000 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 经 0.22 μm 微孔滤膜过滤。副干酪乳杆菌 Lab5细胞裂解物的制备: 取菌悬液在冰浴中超声破碎细胞(功率 300 W、工作时间 2 s、间隔 3 s、循环 900 次)。

1.2.3 热稳定性 副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液分别在 60、70、80、90、100、121 ℃ 温度下处理 25 min 后, 冷却至室温, 以室温(25 ℃)未经热处理的副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 为对照组, 采用牛津杯法进行抑菌实验。

1.2.4 蛋白酶敏感性 向热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 加入 5%(v/v)相应蛋白酶, 各蛋白酶终浓度为 1.0 g/L。用 1 mol/L HCl 和 1 mol/L NaOH 调 pH 分别至糜蛋白酶(最适 pH8.0, 37 ℃), 胰蛋白酶(最适 pH7.8, 37 ℃), 肠激酶(最适 pH8.0, 30 ℃), 蛋白酶 K(最适 pH7.5, 50 ℃), 木瓜蛋白酶(最适 pH7.0, 60 ℃), 胃蛋白酶(最适 pH3.0, 37 ℃)最适 pH、温度下处理 1 h, 然后将处理后的溶液 pH 调至上清液初始 pH(3.50)。以不做酶处理的热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 作为对照组, 进行抑菌实验。

1.2.5 pH 稳定性 以 1 mol/L HCl 与 1 mol/L NaOH 调整灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 的 pH 至 3、4、5、6、7、8, 室温静置 1 h, 即得到相应 pH 处理的灭活 CFS, 后调回至溶液初始 pH(3.51)。控制溶液终体积一致。设未 pH 处理的灭活 CFS 组为对照组(pH3.51), 以 MRS 液体培养基作空白参照。

1.2.6 副干酪乳杆菌 Lab5 生长曲线的测定 副干酪乳杆菌 Lab5 菌液以 2% 的接种量接种于 150 mL MRS 液体培养基中 37 ℃ 培养 2 d。每隔 2 h 取样, 38 h 后间隔 3~4 h 取样, 取 5 mL 菌液置于离心管中, 测量 $OD_{600\ nm}$ 值和 pH。取样品发酵上清液做抑菌实验, 以 MRS 培养基作为空白对照, 测量抑菌圈的直径。

1.2.7 最小抑菌质量浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)测定 将灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 分装至 100 mL 无菌离心管中, 每管约 20 mL, −80 ℃ 预冷 48 h, 于真空冷冻干燥机中冻干 2 d, 取出立即研磨成粉末, 密封备用。

参考 Yu 等[14] 的方法, 微量肉汤稀释法测定 MIC。用 LB 肉汤溶解热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 冻干粉使其质量浓度为 400 mg/mL, 随后用 LB 肉汤进行对半稀释, 使其终质量浓度分别为 200、100、50、25、12.5、6.25、3.125、1.5625、0.78125 和 0.390625 mg/mL, 然后加入 100 μL 单增李斯特菌液(5×10^5 CFU/mL)于孔板中。其中 LB 肉汤与单增李斯特菌液混合液为阳性对照; 200 mg/mL 热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 为阴性对照。孔板置于 37 ℃ 培养 24 h, 于酶标仪测定 600 nm 处吸光值, MIC 为读数与阴性对照平均值无显著差异的处理组。

1.2.8 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元在杜黑猪肉保鲜中的应用

1.2.8.1 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元的制备及冷鲜猪肉的处理 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元的制备: 参考刘银雪等[15] 取经 121 ℃ 处理 25 min 热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 于真空冷冻干燥后得到后生元冻干粉备用。

以 75% 酒精擦拭用具后紫外照射 20 min，取杜黑猪背最长肌肉，剔筋去膜，切分成约 150 g 且厚度相近肉块。设对照组（不处理）与处理组（配制 2MIC、4MIC 浓度副干酪乳杆菌 Lab5 后生元溶液并均匀涂于猪肉样品表面）置于方形塑料盒中。塑料盒用保鲜膜包裹，以确保盒内外之间的空气交换。样品放于 4 ℃ 冷库，每隔 1 d 取样测定。

1.2.8.2　微生物指标测定　参照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》，样品每隔 1 d 取样，梯度稀释后进行涂布，于 37 ℃ 培养 48 h 后计数。

1.2.8.3　感官质量评定　感官质量评定遵循 GB/T 22210-2008《肉与肉制品感官评定规范》。挑选 10 名受过培训人员组成感官评定小组，分别对感官指标进行综合评定。结果均采用 10 分法呈现，评价标准见表 2。

1.2.8.4　理化指标测定　肉色采用色差仪测定 L^*，a^*，b^*值，每组测定 5 个不同点；样品 pH 使用插入式 pH 计测量，每组测量三次；挥发性盐基氮（TVB-N）含量的测定参考 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进行测定；参照 GB 2707-2016《食品安全国家标准 鲜（冻）畜、禽产品》中标准 TVB-N 值>15 mg/100 g，即为变质肉。以 TVB-N 值为 15 mg/100 g 和菌落总数为 10^6 CFU/g 作为判断货架期终点的界限。

硫代巴比妥酸（thiobarbituric acid value，TBARS）值：参考 Fan 等[16] 的方法，称取 10.0 g 搅碎的猪肉样品，加 50 mL 7.5% 三氯乙酸溶液（含 0.1% 乙二胺四乙酸），1000 r/min 振荡混匀 30 min，双层滤纸过滤 2 次，均弃初滤液。取 5 mL 滤液与 5 mL 0.02% 硫代巴比妥酸水溶液混合，90 ℃ 水浴 40 min。冷却至室温后 1600 r/min 离心 5 min，取 8 mL 上清液与 5 mL 三氯甲烷于试管中混匀，静置分层取上清液。以样品空白调零，测定 532 nm 和 600 nm 处光度值。平行测定 3 次。TBARS 含量以每公斤肉的丙二醛毫克数（MDA）表示，计算公式如下：

$$\mathrm{TBARS(mg/kg)}=\frac{A_{532}-A_{600}}{155}\times\frac{1}{10}\times72.6\times1000$$

式中：丙二醛与硫代巴比妥酸反应物的消光系数 155$(\mathrm{mmol\cdot L^{-1}})^{-1}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$。

1.3　数据处理

每组实验重复测定 3 次，结果用平均值±标准差表示；试验数据采用 Graphpad Prism 9 软件作图，以 SPSS 24 软件采用双尾 t 检验对数据进行显著性差异分析（P<0.05）。

2　结果与分析

2.1　不同乳酸菌菌液与其热灭活菌液的抗菌活性

牛津杯法检测到各乳酸菌菌株发酵菌液对指示菌均有一定抑制生长的作用，抑杀单增李斯特菌比大肠杆菌效果好。如图 1 显示，Lab5 菌株对单增李斯特菌抑菌效果最好，抑菌圈为 38.28±1.97 mm。研究经热灭活处理的乳酸菌液对指示菌抑菌效果发现，经 121 ℃ 下 25 min 热灭活处理后的菌液仍有较高的抑菌活性。Lab5 热灭活与未做处理的菌液相比，

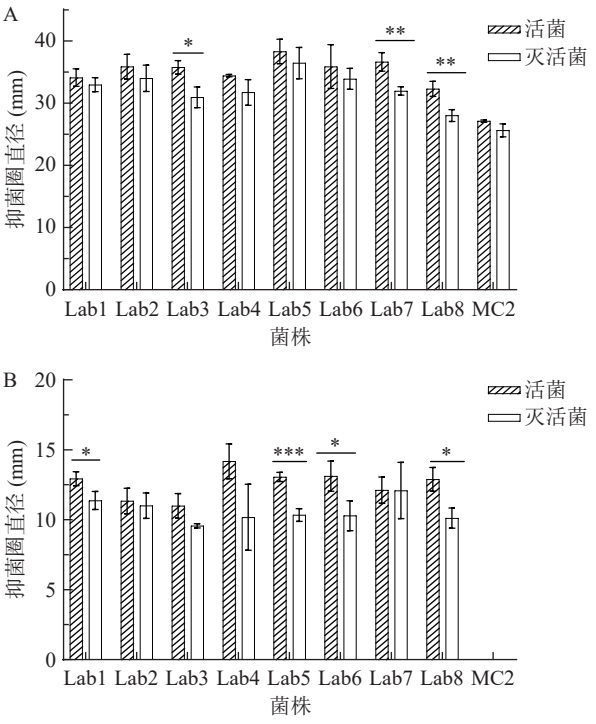


图 1　热灭活与非灭活乳酸菌液对指示菌生长影响

Fig.1　Effects of heat-inactivated and non-inactivated lactic acid bacteria on the growth of indicator bacteria

注：A 图：指示菌 *Listeria monocytogenes* ATCC 19115，B 图：指示菌 *Escherichia coli* ATCC 25922；图中“*”、“**”、“***”分别代表同一菌株活菌与热灭活菌对指示菌（*Listeria monocytogenes* ATCC 19115 或 *Escherichia coli* ATCC 25922）抑菌圈直径差异的不同显著性，即 P<0.05，P<0.01 和 P<0.001。

表 2　冷鲜肉感官评定标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for chilled meat

指标	10~8分	6~8分	4~6分	2~4分	0~2分
色泽	鲜亮有光泽	较鲜亮有光泽	暗红无光泽	暗灰无光泽	暗褐无光泽
气味	鲜味强无异味	鲜味较强无异味	鲜味淡略有异味	无鲜味儿异味较大	无鲜味，重异味且不能接受
弹性	弹性很好，指压后立即恢复	弹性较好，指压后可以恢复	弹性较差，指压后缓慢恢复	弹性基本丧失，指压后不能恢复	无弹性，指压后凹陷明显不恢复
粘度	外部微湿不黏手	外部湿润不黏手	外部干燥微黏手	外部干燥较黏手	外表有粘液很黏手
大理石纹理	纹理清晰，花纹丰富	纹理稍淡，花纹丰富	纹理不清晰，花纹微丰富	纹理模糊，有少量花纹	无纹理

抑菌圈直径为 36.43±2.06 mm。副干酪乳杆菌 Lab5 菌液与其热灭活菌液对单增李斯特菌的抑菌活性无显著差异(P>0.05),说明热灭活处理不影响其对单增李斯特菌的抑菌能力。副干酪乳杆菌 Lab5 菌液抑菌圈直径极显著大于热灭活菌液抑菌圈直径(P<0.001),这一差异可能源于活菌不仅代谢产生有机酸和细菌素等多种抗菌物质,还可以通过菌体的生长繁殖和竞争排斥等作用来促进抑菌效果的产生[17],且后生元与活菌相比,无需冷藏,容易储存且保质期长、携带方便[18]。

2.2 副干酪乳杆菌 Lab5 菌液与热灭活菌液的抗菌活性

为确定不同组分发酵菌液的抑菌活性,制备灭活发酵上清液、灭活菌悬液、细胞裂解物进行抑菌实验,结果如图 2、表 3 所示,发现只有灭活 CFS 对指示菌有抑菌效果,说明具有抑菌效果的物质存在于发酵上清液中。Behrooz等[19] 也发现副干酪乳杆菌 B31-2 的发酵上清液对单增李斯特菌表现出显著抗菌活性,这与本文结果一致,但并未进一步阐明其他组分是否具有抑菌效果。

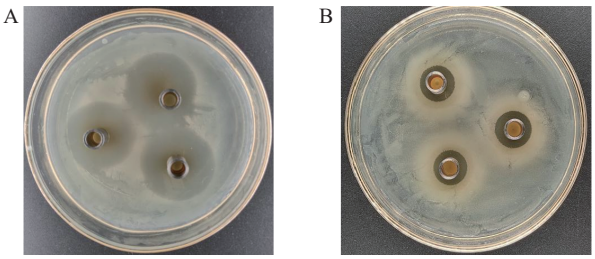


图 2 副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液对不同指示菌的抑菌活性

Fig.2 Antimicrobial activity of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 cell-free fermentation supernatant against different indicator bacteria

注: A 为指示菌 *Listeria monocytogenes* ATCC 19115; B 为指示菌 *Escherichia coli* ATCC 25922。

表 3 副干酪乳杆菌 Lab5 发酵菌液不同组分对指示菌生长性能的影响

Table 3 Effects of different components of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 fermentation strain on the growth performance of indicator bacteria

组分	抑菌圈直径(mm)	
	单增李斯特菌	大肠杆菌
灭活CFS	32.08±2.15	11.02±1.17
灭活菌悬液	–	–
细胞裂解物	–	–

注: “–”表示抑菌圈≤8 mm,即无抑菌圈、无抑菌活性。

2.3 副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液抑菌活性的热稳定性

热稳定性实验结果如图 3,发现随温度的升高,发酵液抑菌活性降低。但经 60、70、80、90、100、121 ℃ 处理后,副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 对单增李斯特菌仍保持较高抑菌活性且无显著性差异(P>0.05)。经 100、121 ℃ 处理后发酵上清液与对照组相比,对大肠杆菌的抑菌活性有差异但不显著(P>0.05)。121 ℃ 处理 25 min 后,副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 对单增李斯特菌和大肠杆菌抑菌圈仍分别达到 32.07±2.1 mm、11.53±0.44 mm,以上结果表明副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 热稳定性好。

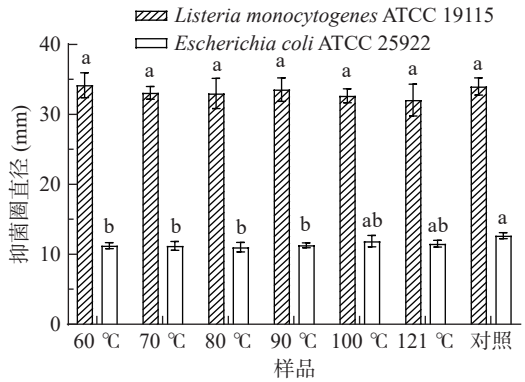


图 3 温度对副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液抑菌活性的影响

Fig.3 Effects of temperature on the antibacterial activity of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 cell-free fermentation supernatant

注: 图中不同小写字母代表不同温度处理组对指示菌(*Listeria monocytogenes* ATCC 19115 或 *Escherichia coli ATCC* 25922)抑菌圈直径的差异显著(P<0.05),图 4~图 5 同。

Huang 等[20] 发现乳酸菌发酵液粗提物的抗菌活性在 40~100 ℃ 间具有较高的稳定性,而在 121 ℃ 下抑菌面积减少约 26.15%。副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 经 121 ℃ 处理后对单增李斯特菌的抑菌面积减少 10.87%。良好的热稳定性对其应用于食品加工是非常有利的。

2.4 副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液抑菌活性的蛋白酶敏感性

选取 6 种代表性蛋白酶进行抑菌实验,探究其

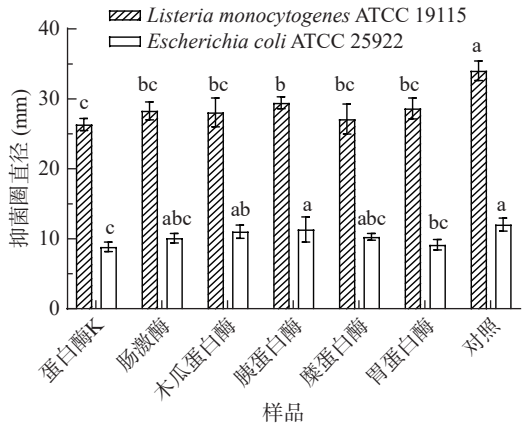


图 4 蛋白酶处理对热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液的抑菌活性的影响

Fig.4 Effects of protease treatment on the heat-antibacterial activity of inactivated *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 cell-free fermentation supernatant

蛋白酶敏感性(图 4)，与对照组相比，热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 经蛋白酶处理后抑菌活性均下降，蛋白酶 K 组对单增李斯特菌和大肠杆菌的抑菌活性影响最大(P<0.05)，抑菌圈直径分别为 26.33±0.74 mm、8.84±0.56 mm，比对照组减小了 7.69 mm、3.18 mm；胃蛋白酶组对单增李斯特菌和大肠杆菌抑菌圈直径分别减小 5.39 mm、2.87 mm。经蛋白酶处理后抑菌活性下降，热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 中可能含有蛋白质或肽类抑菌物质[20]。不同于许多乳酸菌株 CFS 对蛋白酶表现出高敏感性特征，经蛋白酶 K、胃蛋白酶、胰蛋白酶和木瓜蛋白酶处理后完全丧失活性[21−25]。副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 经蛋白酶处理后虽抑菌活性下降但仍有较好抑菌效果，结果表明其对六种蛋白酶较不敏感，在食品工业中具有很好的应用潜力[26]。

2.5　副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液抑菌活性的 pH 稳定性

如图 5 所示，将灭活副干酪乳杆菌发酵液的 pH 调整至不同 pH 处理 1 h，在 pH3.0~8.0 时抑菌活性未发生显著变化(P>0.05)，在接近初始 pH3.51 的 pH4 时抑菌活性降低最少，当 pH9.0 时，副干酪乳杆菌 Lab5 灭活发酵上清液抑菌活性显著降低(P<0.05)。在强碱性条件下，副干酪乳杆菌 Lab CFS 抑菌活性降低可能是由于其中含有乳酸、乙酸等有机酸，有机酸因解离而失去抑菌活性[27]。乳酸菌代谢产物具有广谱抑菌性，其抑菌活性具有酸依赖性，例如乳酸链球菌代谢产物[28]，而副干酪乳杆菌 Lab5 灭活发酵上清液在 pH3.0~8.0 范围内 pH 稳定性好，为其在猪肉等食品保鲜中应用提供了可能性。

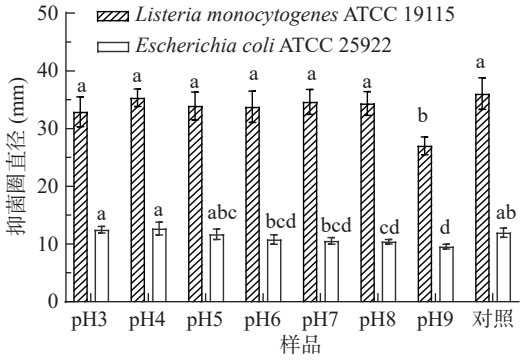


图 5　pH 对热灭活副干酪乳杆菌 Lab5 发酵上清液的抑菌活性的影响

Fig.5　Effects of pH on the heat-antimicrobial activity of inactivated *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 cell-free fermentation supernatant

2.6　副干酪乳杆菌 Lab5 生长曲线及其灭活 CFS 抑制单增李斯特菌的最小抑菌浓度

生长曲线如图 6，$OD_{600\ nm}$ 值显示培养 6~18 h 即进入对数生长期，20 h 左右进入稳定期。pH 在培养 6 h 后开始发生变化，6~24 h pH 迅速下降，从

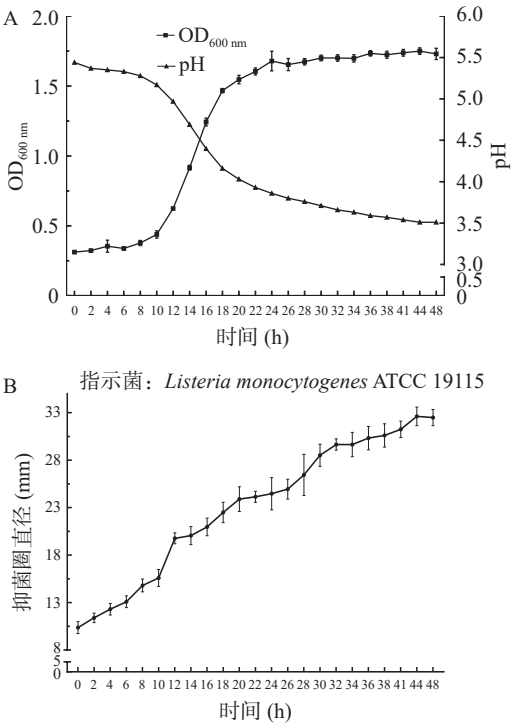


图 6　副干酪乳杆菌 Lab5 的生长曲线及抑菌活性

Fig.6　Growth curves and bacteriostatic activity of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5

5.33 降至 3.86，24~41 h pH 缓慢下降，41 h 后恒定在 3.5 左右。抑菌实验结果显示副干酪乳杆菌生长开始产生抑菌物质，培养 44 h 时抑菌活性达到最高，随后保持稳定。整个过程与 pH 的变化无关，结果表明副干酪乳杆菌 Lab5 在整个生长期间一直产生抑菌物质。

微量肉汤稀释法结果显示灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 低于 12.5 mg/mL 时单增李斯特菌可以生长，而 12.5 mg/mL 浓度处理下的 $OD_{600\ nm}$ 值与阴性对照组无显著差异，表明 *Listeria monocytogenes* ATCC 19115 生长完全受到抑制，因此确定其对单增李斯特菌的 MIC 为 12.5 mg/mL。

2.7　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元在杜黑猪肉保鲜中的应用

2.7.1　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏猪肉菌落总数的影响　微生物污染是鲜肉变质的主要因素之一，因此菌落总数是评价肉类新鲜程度的重要指标[29]。副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对不同冷藏时间下杜黑猪肉中菌落总数影响如图 7。根据 GB/T 9959.2-2008《分割鲜、冻猪瘦肉》中冷鲜猪瘦肉菌落总数应低于 10^6 CFU/g。对照组菌落总数在 4 ℃ 储存 3 d 时为 5.44×10^6 CFU/g，略超过国标，9 d 时菌落总数高达 1.36×10^9 CFU/g。与对照组相比，冷藏 9 d 内后生元浓度为 2MIC、4MIC 组菌落总数显著低于对照组(P<0.05)，且 4MIC 组抑菌效果更好。2MIC 组储存 5 d 时菌落总数为 1.2×10^6 CFU/g 超过国标；4MIC组储存 7 d 时达到 1.28×10^6 CFU/g。9 d 时，

2MIC、4MIC 两组菌落总数无显著性差异(P>0.05)，分别为 4.08×10^6 CFU/g、4.04×10^6 CFU/g。可见将副干酪乳杆菌 Lab5 后生元涂抹在猪肉表面可减缓细菌生长繁殖，延缓猪肉冷藏劣化，对冷却猪肉起到较好的保鲜效果。

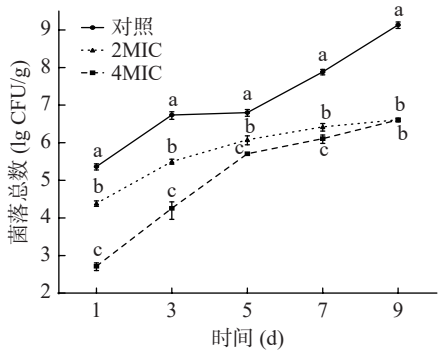


图 7 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏杜黑猪肉菌落总数的影响

Fig.7 Effects of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 postbiotics on the total plate count of colonies in refrigerated Duhei pork

注：图中不同字母分别代表不同时间下三组样品菌落总数的差异显著(P<0.05)。

2.7.2 后生元浓度为 Lab5 后生元对冷藏猪肉感官质量的影响 对各感官指标得分求均值做雷达图，如图 8 所示，各项得分随冷藏时间下降。除大理石花纹指标外，副干酪乳杆菌 Lab5 后生元浓度为 2MIC、4MIC 组感官指标得分下降幅度均小于对照组。色泽方面，2MIC 和 4MIC 后生元处理组在 1 d 时影响猪肉色泽，但随冷藏时间增加，2MIC 和 4MIC 组比对照组得分更高，两处理组间无差异(P>0.05)。两处理组气味得分高于对照组，且 2MIC 组最高。粘度和弹性得分显示，两处理组比对照组略高但无显著差异(P>0.05)，且并未显示后生元浓度增加对冷藏猪肉粘度和弹性有改善。三组各冷藏时间大理石花纹得分无显著差异(P>0.05)。表明在猪肉表面涂抹副干酪乳杆菌 Lab5 后生元可护色，改善气味，延缓冷却猪肉的感官质量的下降。

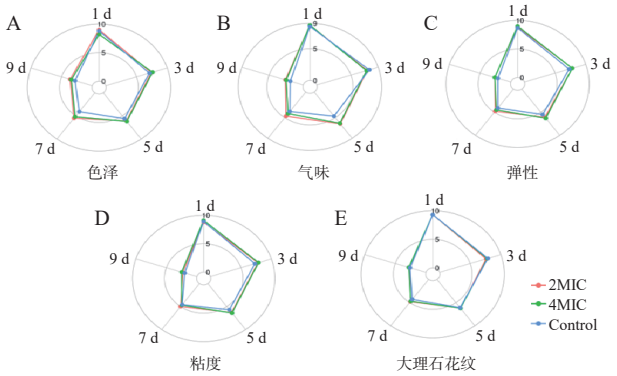


图 8 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏杜黑猪肉感官质量的影响

Fig.8 Effects of postbiotics of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 on the sensory quality of refrigerated Duhei pork

注：A~E 分别为不同储藏时间下各组猪肉样品色泽、气味、弹性、粘度、大理石花纹感官评分雷达图。

2.7.3 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏猪肉色泽的影响 肉色在一定程度体现猪肉的品质，直接影响消费者的感官[30]。肉色测定结果如图 9，L^*值先上升后下降，亮度值上升是由于肉表面的水增强了光的反射[31]，后随冷藏时间延长，肉失水逐渐干燥变粘。0 d 和 9 d 时，均是后生元 4MIC 组亮度最高，对照组亮度最低，表明副干酪乳杆菌 Lab5 后生元涂抹在冷却猪肉表面能增加猪肉亮度，且冷藏 9 d 仍能保持较高亮度。a^*值表示红度，呈先升后降的趋势，对照组降幅最大，4MIC 组降幅最小。因为肉中肌红蛋白与空气接触为氧合肌红蛋白，后逐渐氧化成深褐色的高铁肌红蛋白(MetMb)，a^*值下降[32]，表明后生元对 a^*值影响不大。b^*值表示黄度，0 d 的 4MIC 组 b^*值最高，

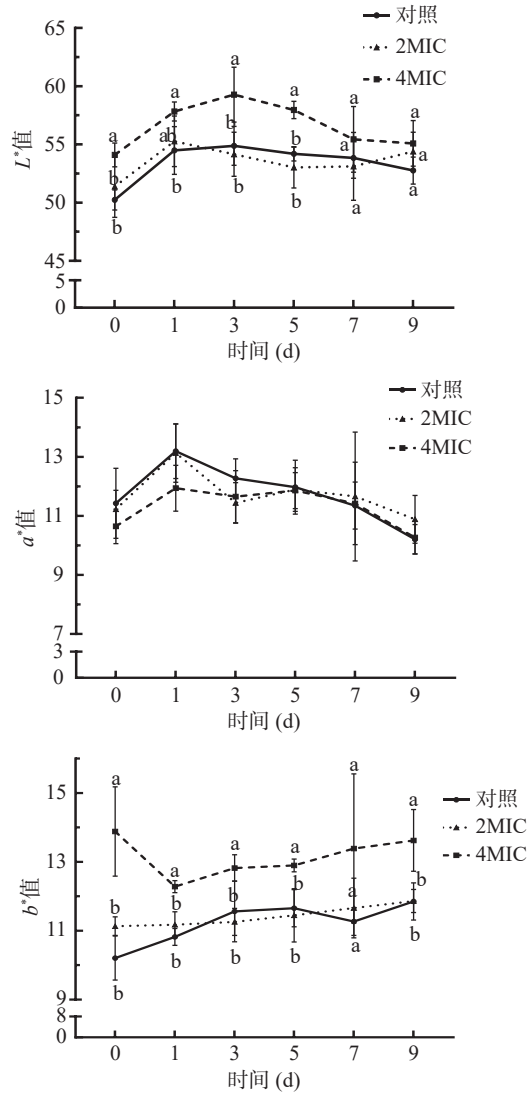


图 9 副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏杜黑猪肉色泽的影响

Fig.9 Effects of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 postbiotics on the color of refrigerated Duhei pork

注：图中不同字母代表不同时间下三组样品肉色的差异显著(P<0.05)。

其次是 2MIC 组。9 d 时 4MIC 组 b^*值显著高于另外两组(P<0.05)。后生元组肉色变化与对照组相比更为稳定，可能是由于后生元具有较强抗氧化活性，避免肌红蛋白被过度氧化。综上，冷却猪肉涂抹后生元有一定的抗氧化作用，延缓肉色改变，且 4MIC 组护色效果最好。有研究表明乳酸菌可能存在 MetMb 还原酶或细菌素，能稳定肉色，起到护色作用[33]。

2.7.4　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏猪肉 pH 的影响　pH 是判断冷却猪肉新鲜度的重要理化指标。依据 GB/T 9695.5-2008《肉与肉制品 pH 值测定》：pH>6.7 为变质肉。图 10 显示冷藏猪肉 pH 整体趋势是 0~3 d 先降低，3~9 d 后上升。因冷藏初期猪肉细胞内部呼吸作用使肌糖原酵解、ATP 分解产生磷酸、乳酸等酸性物质；后期微生物大量繁殖，蛋白质在蛋白酶的作用下被分解产生氨和胺类等碱性化合物，导致 pH 上升[34−35]。对照组 9 d 时 pH 显示为变质肉，此时后生元 2MIC 与 4MIC 组 pH 无显著差异(P>0.05)，分别为 6.37、6.36。与对照组相比，两处理组 pH 变化明显变缓，表明副干酪乳杆菌 Lab5 后生元应用于猪肉冷藏中可显著延缓 pH 变化，延长冷藏货架期。

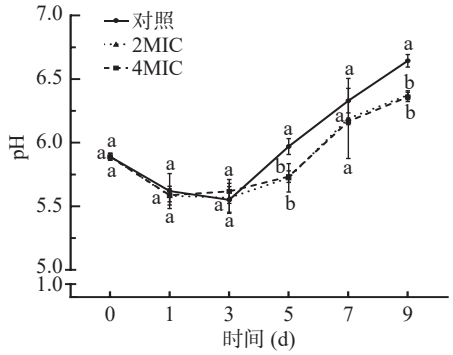


图 10　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏杜黑猪肉 pH 的影响

Fig.10　Effects of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 postbiotics on the pH of refrigerated Duhei pork

注：图中不同字母代表不同时间下三组样品 pH 的差异显著(P<0.05)。

2.7.5　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏猪肉 TVB-N 含量的影响　猪肉蛋白在酶和微生物作用下，产生胺类等含氮化合物，故测量冷藏猪肉中的 TVB-N 的含量能反映肉的鲜度[36−37]。图 11 显示，随冷藏时间增加，TVB-N 含量逐渐增加，对照组 TVB-N 含量增加最快，后生元 4MIC 组增加最慢。对照组 3 d 时，TVB-N 含量略超标准已变质，达到 17.88 mg/100 g，而此时 2MIC、4MIC 组均未超过 15 mg/100 g；5 d 时，三组均显示变质，此时两个后生元处理组 TVB-N 含量无显著差异(P>0.05)，分别为 22.40 mg/100 g、23.57 mg/100 g；9 d 时，4MIC 组 TVB-N 含量显著低于其他两组(P<0.05)。本实验以 TVB-N 值为 15 mg/100 g 和菌落总数为 10^6 CFU/g 作为判断货架期终点的界限，对照组货架期为 1 d，2MIC 和 4MIC 组货架期为 3 d。与对照组相比，副干酪乳杆菌 Lab5 后生元涂抹于猪肉表面能抑制相关酶活性及微生物繁殖来降低 TVB-N 的产生，可有效延长猪肉货架期 2 d 。

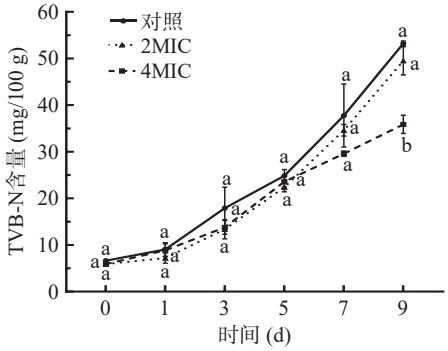


图 11　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏杜黑猪肉 TVB-N 含量的影响

Fig.11　Effects of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 postbiotics on TVB-N content in refrigerated Duhei pork

注：图中不同字母代表不同时间下三组样品 TVB-N 含量的差异显著(P<0.05)。

2.7.6　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏猪肉 TBARS 的影响　TBARS 常用来衡量肉类脂质氧化程度，TBARS 值越高，表明肉中脂质氧化程度越高，肉越不新鲜[38−39]。由图 12 可以看出，冷藏时间越长，各组 TBARS 值均升高。冷藏 9 d 时，对照组、2MIC 和 4MIC 组 TBARS 值分别为 1.80、1.14、0.89 mg/kg。后生元 2MIC 和 4MIC 组在冷藏 7、9 d 时 TBARS 值明显低于对照组(P<0.05)，且 4MIC 组TBARS 值最低，效果较好。后生元抑制肉中不饱和脂肪酸在氧自由基的作用下发生自由基链式反应，且后生元的抑菌作用，间接抑制脂肪氧化的发生，延缓丙二醛的产生。表明副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏猪肉的脂质氧化有较强的抑制作用。有研究也发现益生菌制剂能延缓干香肠和猪颈氧化，使 TBARS 变化和肉

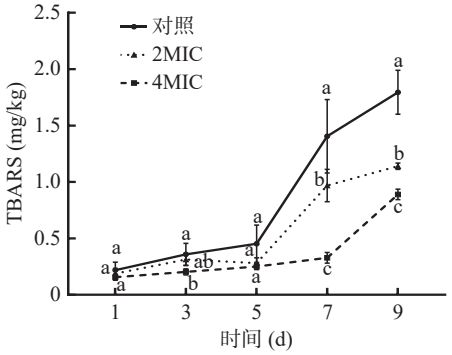


图 12　副干酪乳杆菌 Lab5 后生元对冷藏杜黑猪肉 TBARS 的影响

Fig.12　Effects of *Lacticaseibacillus paracasei* Lab5 postbiotics on TBARS of refrigerated Duhei pork

注：图中不同字母代表不同时间下三组样品 TBARS 的差异显著(P<0.05)。

色更稳定[40]。

3 结论

本研究表明副干酪乳杆菌 Lab5 发酵液对单增李斯特菌和大肠杆菌的生长均有显著抑制作用，尤其对单增李斯特菌的抑制效果更为突出，抑菌圈直径达 38.28±1.97 mm。此外，副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 经 60~121 ℃ 处理 25 min，其对单增李斯特菌和大肠杆菌抑菌圈直径分别超过 32.07±2.1 mm、11.53±0.44 mm，表明其具有良好的热稳定性，灭活副干酪乳杆菌 Lab5 CFS 在 pH3.0~8.0 时 pH 稳定性好，经六类蛋白酶（糜蛋白酶、胰蛋白酶、肠激酶、蛋白酶 K、木瓜蛋白酶、胃蛋白酶）处理后仍有较好的抑菌效果，表明其对蛋白酶不敏感。副干酪乳杆菌 Lab5 整个生长过程持续产生抑菌物质，44 h 时抑菌活性最高且与 pH 变化无关，测得其对单增李斯特菌的 MIC 为 12.5 mg/mL。在杜黑猪肉保鲜的应用实验中，Lab5 后生元显著降低肉品的菌落总数，延缓了 pH 变化，减少了 TVB-N 和 TBARS 的生成（P<0.05），有效维持肉品品质并延长了货架期 2 d。感官实验也显示副干酪乳杆菌 Lab5 后生元可改善气味，护色，延缓冷却猪肉的感官质量的下降，特别是 4MIC 组各项指标上均表现最佳。目前副干酪乳杆菌 Lab5 后生元初步应用于猪肉保鲜，后续可与化学保鲜剂复合涂膜、气调保藏等其他保鲜技术协同使用，大大提升保鲜效果。本研究为副干酪乳杆菌后生元在肉类保鲜中广泛应用提供了科学依据，为食品安全和品质控制提供更多解决方案。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] AGUILAR-TOALA J E, ARIOLI S, BEHARE P, et al. Postbiotics-when simplification fails to clarify[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2021, 18(11): 825−826.

[2] 吕静, 樊怡君, 郭浩佳, 等. 后生元及其在肉制品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(4): 383−391. [LÜ J, FAN Y J, GUO H J, et al. Research progress of postbiotics and their application in meat products[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 383−391.]

[3] ZHENG X, NIE W X, XU J, et al. Characterization of antifungal cyclic dipeptides of *Lacticaseibacillus paracasei* ZX1231 and active packaging film prepared with its cell-free supernatant and bacterial nanocellulose[J]. Food Research International, 2022, 162 (Part A): 112024.

[4] DONG H, REN X P, SONG Y X, et al. Assessment of multifunctional activity of a postbiotic preparation derived from *Lacticaseibacillus paracasei* postbiotic-P6[J]. Foods, 2024, 13: 2326.

[5] BARCENILLA C, PUENTE A, COBO-DIAZ J F, et al. Evaluation of the performance of a three-strains lactic acid bacteria cocktail for the control of *Listeria monocytogenes* on marinated lean pork[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 200: 116166.

[6] 彭勃, 冯孔龙, 苗建银, 等. 副干酪乳杆菌 FX-6 产抗菌肽粗提物对荔枝贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 249−255. [PENG B, FENG K L, MIAO J Y, et al. Effect of crude extract containing antimicrobial peptide produced by *Lactobacillus paracasei* subsp. tolerans FX-6 on the quality of litchi during storage[J]. Food Science, 2018, 39(7): 249−255.]

[7] 刘丛丛, 纪凤娣, 姜良萍, 等. 副干酪乳杆菌 H9 复合涂膜技术对草鱼的生物保鲜作用[J]. 食品科技, 2013, 38(11): 146−152. [LIU C C, JI F D, JIANG L P, et al. Bio-preservative effects of *Lactobacillus paracasei* H9 in sodium alginate coating on grass carp[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(11): 146−152.]

[8] DANZA A, LUCERA A, LAVERMICOCCA P, et al. Tuna burgers preserved by the selected *Lactobacillus paracasei* IMPC 4.1 Strain[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11: 1651−1661.

[9] GUSTAVSSON J, CEDERBERG C, SONESSON U, et al. Global food losses and food waste[C]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2011.

[10] ODEYEMI O A, ALEGBELEVE O O, STRATEVA M, et al. Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(2): 311−331.

[11] SHAO L T, CHEN S S, WANG H D, et al. Advances in understanding the predominance, phenotypes, and mechanisms of bacteria related to meat spoilage[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 822−832.

[12] 吴卓穗, 李剑豪, 曾检华, 等. 中国主要地方猪资源性能统计分析[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(1): 263−271. [WU Z S, LI J H, ZENG J H, et al. Statistical analysis on the performance of major local pig resources in China[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2025, 61(1): 263−271.]

[13] XU Y R, NIU Y F, WU C H, et al. Synthesis, characterization, antifungal properties of quaternary ammonium salts derived from natural rosin[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(16): 18803−18811.

[14] YU X X, LI J Y, MU D, et al. Green synthesis and characterizations of silver nanoparticles with enhanced antibacterial properties by secondary metabolites of Bacillus subtilis (SDUM301120)[J]. Green Chemistry Letters and Reviews, 2021, 14(2): 189−202.

[15] 刘银雪, 韩佶佟, 黄冬成, 等. 植物乳植杆菌 Q7 后生元在馒头和牛乳防腐保鲜中的应用研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(8): 97−102. [LIU Yinxue, HAN Jitong, HUANG Dongcheng, et al. Application of *Lactobacillus plantarum* Q7 postbiotic in the preservation of steamed buns and milk[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(8): 97−102.]

[16] FAN X J, LIU S Z, LI H H, et al. Effects of *Portulaca oleracea* L. extract on lipid oxidation and color of pork meat during refrigerated storage[J]. Meat Science, 2019, 147: 82−90.

[17] SHI C, CHEN Y Y, LI C Z, et al. Potential application of *Lactiplantibacillus plantarum* in food bio-preservation - A comprehensive review with a focus on the antibacterial and anti-virulence effects on foodborne pathogens[J]. Food Reviews International, 2024, 40(9): 2993−3019.

[18] 谢莹莹, 庞旭, 周海泳, 等. 后生元的作用机制及其在食品领域的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 354−363. [XIE Y Y, PANG X, ZHOU H Y, et al. Action mechanisms of postbiotics and their applications in food field[J]. Food Science, 2024, 45(8): 354−363.]

[19] BEHROOZ A B, HOSSEIN J, MORTEZA T, et al. Evaluation of the probiotic, anti-bacterial, anti-biofilm, and safety properties of *Lacticaseibacillus paracasei* B31-2[J]. LWT, 2024, 207:

116676.
［20］ HUANG T, LI Z, QU X, et al. Preliminary purification and partial characterization of a functional bacteriocin of *Lacticaseibacillus paracasei* Zhang and Mining for its gene cluster[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2025, 17(2): 487−499.
［21］ ZHU Y, ZHOU Q, LI P, et al. Purification, characterization, and mode of action of paracin 54, a novel bacteriocin against Staphylococci[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(18): 6735−6748.
［22］ HEREDIA-CASTRO P Y, REYES-DIAZ R, RENDON-ROSALES M, et al. Novel bacteriocins produced by *Lactobacillus fermentum* strains with bacteriostatic effects in milk against selected indicator microorganisms[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(4): 4033−4043.
［23］ WU D, DAI M, SHI Y, et al. Purification and characterization of bacteriocin produced by a strain of *Lacticaseibacillus rhamnosus* ZFM216[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1050807.
［24］ ZHANG L W, YI H X, LIU H, et al. Identification and characterization of plantaricin Q7, a novel plantaricin produced by *Lactobacillus plantarum* Q7[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 386−390.
［25］ PENG S, SONG J, ZENG W, et al. A broad-spectrum novel bacteriocin produced by *Lactobacillus plantarum* SHY 21–2 from yak yogurt: purification, antimicrobial characteristics and antibacterial mechanism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142(5): 110955.
［26］ HUANG F, TENG K, LIU Y, et al. Bacteriocins: potential for human health[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2021, 2021: 5518825.
［27］ SIMOES L, FERNANDES N, TEIXEIRA J, et al. Brazilian table olives: a source of Lactic Acid Bacteria with antimycotoxigenic and antifungal activity[J]. Toxins, 2023, 15(1): 71.
［28］ EL-SHAFEI H A, ABD-EL-SABOUR H, IBRAHIM N, et al. Isolation, screening and characterization of bacteriocin-producing lactic acid bacteria isolated from traditional fermented food[J]. Microbiological Research, 2000, 154(4): 321−31.
［29］ SONG X Y, WANG L, LIU T, et al. Mandarin (*Citrus reticulata* L.) essential oil incorporated into chitosan nanoparticles: Characterization, anti-biofilm properties and application in pork preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 620−628.
［30］ 席小辉, 胡瑜文, 张升阳, 等. 肉豆蔻精油/羟丙基-*β*-环糊精包合物对冷鲜猪肉的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(10): 187−196. ［XI X H, HU Y W, ZHANG S Y, et al. Preservation effect of nutmeg essential oil/HP-*β*-CD inclusion complex on chilled pork[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(10): 187−196.］
［31］ 杨斌, 曹银娟, 余群力, 等. 纳米银酯化淀粉膜对牛肉保鲜的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 199−205. ［YANG B, CAO Y J, YU Q L, et al. Application of nanosilver esterified starch film in beef preservation[J]. Food Science, 2019, 40(23): 199−205.］
［32］ 邵楚瑶, 戴瑞彤. 柠檬精油纳米乳液对调理猪肉饼保鲜效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2550−2557. ［SHAO C Y, DAI R T. Study on the effects of nano-emulsion of lemon essential oil on fresh-keeping of marinated pork patty[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(8): 2550−2557.］
［33］ ZHEN L, VINCENT G, YUHUI H, et al. Effect of Lactobacillus salivarius H strain isolated from Chinese dry-cured ham on the color stability of fresh pork[J]. Food Science and Human Wellness, 2013, 2(3-4): 139-145.
［34］ WANG J, REN B J, BAK K H, et al. Preservative effects of composite biopreservatives on goat meat during chilled storage: Insights into meat quality, high-throughput sequencing and molecular docking[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 184: 115033.
［35］ KARABAGIAS I. , BADEKA A, KONTOMINAS M. G. Shelf life extension of lamb meat using thyme or oregano essential oils and modified atmosphere packaging[J]. Meat Science, 2011, 88(1): 109−116.
［36］ ZHANG H Y, LIANG Y, LI X L, et al. Effect of chitosan-gelatin coating containing nano-encapsulated tarragon essential oil on the preservation of pork slices[J]. Meat Science, 2020, 166: 108137.
［37］ XIONG Y, CHEN M, WARNER R D, et al. Incorporating nisin and grape seed extract in chitosan-gelatine edible coating and its effect on cold storage of fresh pork[J]. Food Control, 2020, 110: 107018.
［38］ DOMINGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.
［39］ EBADI Z, KHODANAZARY A, HOSSEINI S M, et al. The shelf life extension of refrigerated Nemipterus japonicus fillets by chitosan coating incorporated with propolis extract[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 94−102.
［40］ WOJCIAK K M, LIBERA J, STASIAK D M, et al. Technological Aspect of *Lactobacillus acidophilus* Bauer, *Bifidobacterium animalis* BB-12 and *Lactobacillus rhamnosus* LOCK900 USE in Dry-Fermented Pork Neck and Sausage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(3): e12965.