

拮抗副溶血弧菌融合魏斯氏菌 Y10-1 的筛选鉴定及抑菌活性评价

原宝龙^{1,2} 易 晗^{1,2} 申乃坤^{1,2} 梁 颖^{1,2} 唐家昊^{1,2}
张红岩^{1,2} 张 彬^{3,4}

(1. 广西民族大学海洋与生物技术学院, 广西 南宁 530006; 2. 广西多糖材料与改性重点实验室, 广西 南宁 530006; 3. 广西水产科学研究院, 广西 南宁 530021; 4. 广西水产遗传育种与健康养殖重点实验室, 广西 南宁 530021)

摘要: [目的] 从海水鱼肠道中分离筛选出对副溶血弧菌 (*Vibrio parahaemolyticus*) 具有抑制作用的乳酸菌, 并考察其抑菌活性。[方法] 以 *V. parahaemolyticus* 为指示菌, 进行抑菌初筛, 综合形态学、生理生化及 16S rRNA 基因序列分析对菌株进行鉴定; 同时测定该菌株的抑菌谱, 分析其无细胞上清液 (CFS) 的抑菌稳定性、抑菌机理及最小抑菌浓度 (MIC) 等特性。[结果] 筛选得到一株可高效拮抗 *V. parahaemolyticus* 的菌株 Y10-1, 经鉴定为融合魏斯氏菌 (*Weissella confusa*); 该菌株产生的抑菌物质具有广谱抑菌性, 耐高温 (100 °C/15 min), 在 pH 2.0~9.0 范围内对 *V. parahaemolyticus* 具有抑制作用, 对 *V. parahaemolyticus* 的 MIC 为 5%, 在 3×MIC 条件下, 对 *V. parahaemolyticus* 的拮抗效果最明显。[结论] 试验筛选得到的菌株 Y10-1 对 *V. parahaemolyticus* 具有良好的拮抗活性, 在食品行业保鲜中具有较高的开发利用价值。

关键词: 融合魏斯氏菌 Y10-1; 乳酸菌; 拮抗; 细菌素; 副溶血弧菌; 食品保鲜

Screening and identification of a *Vibrio parahaemolyticus*-antagonistic fusion *Weissella confusa* Y10-1 and evaluation of its bacteriostatic activity

Yuan Baolong^{1,2} Yi Han^{1,2} Shen Naikun^{1,2} Liang Ying^{1,2} Tang Jiahao^{1,2}
Zhang Hongyan^{1,2} Zhang Bin^{3,4}

(1. School of Marine Sciences and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi 530006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Polysaccharide Materials and Modification, Nanning, Guangxi 530006, China; 3. Guangxi Academy of Fisheries Sciences, Nanning, Guangxi 530021, China; 4. Guangxi Key Laboratory for Aquatic Genetic Breeding and Healthy Aquaculture, Nanning, Guangxi 530021, China)

Abstract: [Objective] To isolate and screen lactic acid bacteria from the intestinal tract of marine fish with inhibitory activity against *Vibrio parahaemolyticus* and to investigate their antibacterial activity. [Methods] Using *V. parahaemolyticus* as the indicator bacterium, preliminary antibacterial screening was performed. The strain was identified through morphological, physiological, and biochemical characteristics as well as 16S rRNA gene sequence analysis. The antibacterial spectrum of the strain was determined, and the antibacterial stability, antibacterial mechanisms, and minimum inhibitory concentration (MIC) of its cell-free supernatant (CFS) were analyzed. [Results] A strain, Y10-1, showing strong antagonistic activity against *V. parahaemolyticus* was screened and identified as *Weissella*

基金项目: 防城港市科技计划项目 (编号: 防科 AB24002016); 广西民族大学国家级大学生创新创业项目 (编号: 202310608029); 广西科技重大专项 (编号: 桂科 AA23062047)

通信作者: 申乃坤 (1980—), 男, 广西民族大学教授, 博士。E-mail: shennaik05@126.com

收稿日期: 2025-09-17 **改回日期:** 2026-03-04

引用格式: 原宝龙, 易晗, 申乃坤, 等. 拮抗副溶血弧菌融合魏斯氏菌 Y10-1 的筛选鉴定及抑菌活性评价 [J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 10-18.

Citation: Yuan Baolong, Yi Han, Shen Naikun, et al. Screening and identification of a *Vibrio parahaemolyticus*-antagonistic fusion *Weissella confusa* Y10-1 and evaluation of its bacteriostatic activity [J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 10-18.

confusa. The antibacterial substances produced by this strain demonstrated broad-spectrum antibacterial activity, were heat resistant (100 °C for 15 min), and exhibits inhibitory activity against *V. parahaemolyticus* within a pH range of 2.0~9.0. The MIC against *V. parahaemolyticus* was 5%. Under the condition of 3×MIC, the antagonistic effect against *V. parahaemolyticus* was the most pronounced. [Conclusion] The strain Y10-1 screened in this study exhibits good antagonistic activity against *V. parahaemolyticus* and has considerable potential for development and application in food preservation.

Keywords: fusion *Weissella confusa* Y10-1; lactic acid bacteria; antagonism; bacteriocin; *Vibrio parahaemolyticus*; food freshness preservation

副溶血弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)是一种典型的海洋源性人畜共患病原菌,自1990年以来,已长期居于食源性疾病病原体的首位^[1]。*V. parahaemolyticus*易在海鲜表面上形成生物膜,从而在水产品加工过程中持续定殖,显著增加人类的感染风险^[2]。*V. parahaemolyticus*常见于各种生海产品,尤其是软体动物和虾类,不仅会导致对虾急性肝胰腺坏死综合征(AHPNS)或早期死亡综合征(EMS),更是人类急性肠胃炎的主要诱因之一^[3-5]。

目前,食品中对*V. parahaemolyticus*的防控技术以低温运输和高温杀菌为主。但水产品冷冻运输过程中温度的波动,容易导致*V. parahaemolyticus*迅速增殖^[6];在食品加工过程中,通常采用持续性高温来灭杀*V. parahaemolyticus*,利用微生物对高温的热敏性,使其失去活力,从而达到灭菌的效果,但持续性高温也会使食品中的营养物质流失^[7-8]。而益生菌可通过产生细菌素、短链脂肪酸和有机酸等代谢产物来灭杀病原菌,尽可能减少对食品品质的影响^[9-12]。因此,生物防控既可以有效控制致病菌的密度,又能确保食品安全和质量,逐渐成为食品生物防控领域的研究热点。

乳酸菌作为公认安全的微生物,具有物种多样性、抗逆性强和数量多等特点^[13-14]。并且其可通过糖类代谢途径合成细菌素、乳酸及其他抗菌代谢产物,有效抑制食源性病原菌,在食品生物防控领域中具有巨大的应用潜力^[15-18]。Lv等^[19]从大黄蜂肠道筛选的清溪乳杆菌(*Lactobacillus sakei*)对*V. parahaemolyticus*的抑菌圈直径为16 mm左右;Jyoti等^[20]从青口贝中筛选出4株对*V. parahaemolyticus*具有良好抑菌效果的乳酸菌,抑菌圈直径为10~14 mm。目前,有关乳酸菌在食品安全防控领域的研究较多,但针对海洋源性*V. parahaemolyticus*方面的系统研究相对有限,且抑制效果较差。试验拟从海鱼肠中筛选对*V. parahaemolyticus*具有较强拮抗作用的乳酸菌,并对乳酸菌抑菌物质的理化性质进行分析,通过酶敏感性、热稳定性以及pH稳定性等指标,评价乳酸菌抑菌物质的稳定特性,为食品安全防控提供优质的候选菌种,同时为益生菌的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

样品:乳酸菌筛选样品来自北海市某海鲜码头刚捕回的马鲛鱼、沙尖鱼、金丝鱼、泥猛鱼等新鲜海鱼鱼肠;

病原菌:副溶血弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)、美人鱼发光杆菌(*Photobacterium damsela*)、豚鼠气单胞菌(*Aeromonas caviae*)、嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)、维氏气单胞菌(*Aeromonas veronii*)为实验室鉴定、保存;

12.5%一步法PAGE凝胶超快速配制试剂盒:山东思科捷生物技术有限公司;

LB肉汤、MRS肉汤:青岛海博生物科技有限公司;

胰蛋白酶(250 U/mg)、胃蛋白酶(3 000 U/mg):北京百奥莱博科技有限公司;

蜗牛蛋白酶:20 U/mg,上海泰坦科技股份有限公司;

中性蛋白酶(70 U/mg)、碱性蛋白酶(200 U/mg)、木瓜蛋白酶(980 U/mg):北京鸿润宝顺科技有限公司;

过氧化氢酶:100 000 U/g,山东隆科特酶制剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

酶标仪:Epoch型,美国BioTek公司;

冷冻离心机:Centrifuge 5910 Ri型,德国艾本德公司;

PCR仪:T100型,上海超敏生物科技有限公司;

凝胶成像分析仪:WD-9413C型,济南来宝医疗器械有限公司;

恒温培养振荡器:ZWY-2112B型,上海智诚分析仪器制造有限公司;

场发射扫描电子显微镜:Sapphire SUPRA 55型,德国卡尔蔡司公司。

1.2 试验方法

1.2.1 鱼肠道中拮抗*V. parahaemolyticus*乳酸菌的分离

将0.1 g鱼肠样品加入盛有25 mL生理盐水的三角瓶内,振荡2 h使其混匀。取上述悬液进行10倍梯度稀释(10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3}),每个梯度吸取100 μ L涂布于MRS-CaCO₃培养基表面,37 °C恒温培养48 h。待菌落长出后,依据溶钙圈的有无以及菌落形态、颜色的差异,选取目标单菌落进行纯化。取纯化菌株转接至MRS液体培养基,37 °C静置培养24 h。发酵液经4 °C、8 000 r/min离心

10 min 分离菌体沉淀,上清液通过 0.22 μm 滤膜过滤,收集无菌滤液作为无细胞上清液(CFS)。参照孙盛等^[21]的方法,使用琼脂扩散法对 CFS 抑制 *V. parahaemolyticus* 的活性进行复筛,在 90 mm 平皿内制备含 2% 琼脂的 LB 固体培养基,凝固 24 h 后,用直径为 7.5 mm 的无菌枪头垂直戳取琼脂,形成圆柱形孔洞,同时挑出孔内琼脂。每孔加入 200 μL CFS 样品,扩散后 37 $^{\circ}\text{C}$ 倒置培养 24 h,每个菌株做 3 个重复。采用游标卡尺测量抑菌直径,选择抑菌直径最大的菌株进行后续试验。

1.2.2 菌株鉴定

(1) 形态学鉴定:选取拮抗 *V. parahaemolyticus* 效果最好的菌株,经 37 $^{\circ}\text{C}$ 下 MRS 平板培养 24 h 后,对该菌株的菌落特征进行记录,并利用革兰氏染色及扫描电镜技术完成细胞形态的观察。

(2) 生理生化鉴定:参照周龙霞等^[22]的方法。

(3) 分子生物学鉴定:参照杜静芳等^[23]的方法进行 PCR 扩增,测序结果通过 Ezbiocloud 数据库进行比对,使用 MEGA 7.0 软件 Neighbor-Joining 法(自展数为 1 000)构建系统发育进化树。

1.2.3 菌株广谱抑菌性测定 采用琼脂扩散法,检测 *P. damsela*、*A. caviae*、*A. hydrophila* 和 *A. veronii* 的抑菌活性。

1.2.4 乳酸菌生长与拮抗 *V. parahaemolyticus* 活性曲线分析 为监测菌株生长及代谢特性,在 10 mL MRS 液体培养基中接入 200 μL 乳酸菌发酵液,设置培养条件为 37 $^{\circ}\text{C}$ 、200 r/min 振荡培养。每隔 4 h 对培养物进行取样,记录其 OD₆₀₀ 和 pH 数值,并采用 1.2.1 中的方法检测 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的抑菌作用。

1.2.5 乳酸菌 CFS 拮抗 *V. parahaemolyticus* 活性的影响因素

(1) 酶敏感性试验:参照马国涵等^[24]的方法并修改。将乳酸菌 CFS 的 pH 分别调节至胃蛋白酶、过氧化氢酶、蜗牛蛋白酶、胰蛋白酶、木瓜蛋白酶、中性蛋白酶及碱性蛋白酶的最适反应条件,随后添加各酶至终质量浓度 1.0 mg/mL,混匀后置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中持续作用 2 h,再经 65 $^{\circ}\text{C}$ 加热 10 min 以终止反应。待反应液冷却后,将其 pH 值调回至与对照组一致,并用 0.22 μm 滤膜过滤除菌。对照组为未经任何处理的乳酸菌 CFS,并按照 1.2.1 的方法测定乳酸菌 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的抑菌活性。

(2) pH 值稳定性试验:用 1.0 mol/L NaOH 和 1.0 mol/L HCl 将乳酸菌 CFS 的 pH 值分别调至 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0,以相同 pH 值的 MRS 液体培养基作为相应的空白对照,并按照 1.2.1 的方法测定乳酸菌 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的抑菌活性。

(3) 热稳定性试验:参照孙华迪等^[25]的方法并修改。将乳酸菌 CFS 分别于 40、60、80、100 $^{\circ}\text{C}$ 下处理 15 min,以

未处理的乳酸菌 CFS 作对照,参照 1.2.1 节所述方法开展抑菌活性测定。同时,按照十二烷基磺酸钠—聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)试剂盒说明书制备 5% 的浓缩胶和 12.5% 的分离胶,120 V 下进行电泳。

1.2.6 乳酸菌 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的最小抑菌浓度(MIC)测定 参照刘珊珊等^[26]的方法并稍作修改。将培养 24 h 的 *V. parahaemolyticus* 菌悬液接种于 96 孔板中的 LB 培养基内,并与乳酸菌 CFS 按不同体积混合,使乳酸菌 CFS 终浓度分别为 0、5%、10%、20%、40%、80%、100%,每组设置 3 个重复。培养条件设为 37 $^{\circ}\text{C}$ 静置培养 24 h,结束后使用酶标仪测定其在 OD₆₀₀ 值。

1.2.7 扫描电子显微镜分析 向 *V. parahaemolyticus* 菌悬液中分别加入 1 $\times$ MIC、2 $\times$ MIC 和 3 $\times$ MIC 乳酸菌 Y10-1 CFS,以无菌水为对照,37 $^{\circ}\text{C}$ 静置培养 4 h。菌液经 6 000 r/min 离心 5 min 收集菌体沉淀,加入 2.5% 戊二醛溶液重悬,于 4 $^{\circ}\text{C}$ 固定过夜。次日用 PBS 缓冲液漂洗 2 次,以去除残留固定液。菌体经 30%~100% 的梯度乙醇(30%、50%、70%、90%、100%)进行脱水,各级乙醇处理时长均为 15 min,取脱水处理后的菌液滴于盖玻片上,待其在室温下自然干燥后,进行喷铂处理,最后置于扫描电子显微镜下观察菌体形态。

1.3 数据处理

各试验均重复测定 3 次,结果用 $\bar{x}\pm s$ 表示。采用 Excel 2016 软件进行数据处理和分析,采用 Prism 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 海产品肠道拮抗 *V. parahaemolyticus* 菌株筛选

从海鱼肠道中共筛选出 15 株具有溶钙圈的菌株,进一步利用琼脂扩散法复筛获得 8 株对 *V. parahaemolyticus* 具有抑制活性的菌株(见表 1),其中菌株 Y10-1 的抑菌活性最好,抑菌圈直径可达 (18.54 $\pm$ 0.61) mm。因此,选取菌株 Y10-1 进行鉴定及抑菌活性分析。

2.2 菌株 Y10-1 的鉴定

2.2.1 形态学鉴定及生理生化鉴定结果 由图 1 可知,菌株 Y10-1 菌落表面光滑且颜色为乳白色,边缘整齐呈圆形,革兰氏染色为阳性;菌落成对排列,大小约为 1~2 μm 。

表 1 乳酸菌对 *V. parahaemolyticus* 的抑制效果
Table 1 Inhibitory effect of lactic acid bacteria on *V. parahaemolyticus*

样品	抑菌圈直径/mm	样品	抑菌圈直径/mm
Y6-1	10.14 $\pm$ 0.76	Y10-3	14.30 $\pm$ 0.88
Y8-1	17.42 $\pm$ 0.65	Y10-5	15.61 $\pm$ 0.14
Y10-1	18.54 $\pm$ 0.61	N-4	14.79 $\pm$ 0.58
Y10-2	12.88 $\pm$ 0.71	S2-2	12.60 $\pm$ 0.32

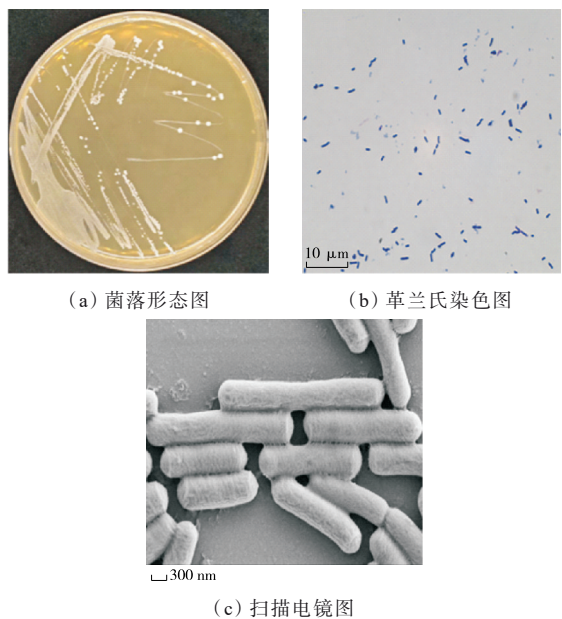


图1 菌株 Y10-1 形态学鉴定

Figure 1 Morphological identification of strain Y10-1

由表 2 可知,麦芽糖、半乳糖、果糖、山梨醇、鼠李糖和棉子糖可作为唯一碳源被菌株 Y10-1 利用,在明胶液化试验、脲酶试验、V-P 试验、硫化氢产气试验、吲哚试验和淀粉水解试验中均呈阴性。

表 2 菌株 Y10-1 生理生化鉴定结果[†]

Table 2 Physiological and biochemical characterization of strain Y10-1

项目名称	结果	项目名称	结果
甘露醇	—	肌醇	—
蔗糖	—	棉子糖	+
乳糖	—	革兰氏染色	+
麦芽糖	+	明胶液化	—
葡萄糖	+	脲酶试验	—
半乳糖	+	V-P 试验	—
果糖	+	硫化氢产生	—
山梨醇	+	吲哚试验	—
纤维二糖	—	淀粉水解试验	—
鼠李糖	+		

[†] “+”表示阳性;“—”表示阴性。

2.2.2 16S rDNA 鉴定 菌株 Y10-1 经 16S rDNA 测序,其碱基总量为 1 474 bp,利用 MEGA 7.0 软件对菌株 Y10-1 的 16S rRNA 基因序列与 NCBI 数据库中的模式菌株进行比对,构建系统发育树(图 2)。结果显示,该菌株与融合魏斯氏菌 JCM 1093 聚于同一分支,同源性达到 99%。因此,可将菌株 Y10-1 鉴定为融合魏斯氏菌(*Weissella*

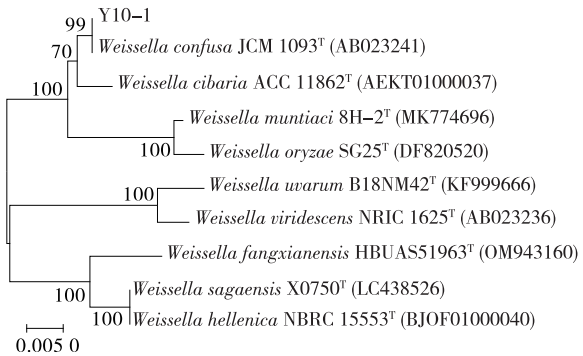


图 2 基于 16S rRNA 构建菌株 Y10-1 的系统发育树
Figure 2 Phylogenetic tree of strain Y10-1 constructed based on 16S rRNA gene sequences

confusa)。

2.3 融合魏斯氏菌 Y10-1 的广谱抑菌活性分析

病原菌体外抑制试验结果显示,菌株 Y10-1 对 *P. damsela*、*A. caviae*、*A. hydrophila* 和 *A. veronii* 4 种食品致病菌均具有较强的抑菌活性,抑菌直径均>19.00 mm(见表 3),显示出良好的广谱抑菌能力。对 *P. damsela* 的抑制中,菌株 Y10-1 的抑菌圈直径高于 Zhang 等^[10]的,而对 *A. hydrophila* 的抑制能力与 Govindaraj 等^[27]的相当。Dinçer 等^[28]研究发现, *Enterococcus faecium* 168-P6 对多种食源性病原体具有显著的抑制活性,与试验中菌株 Y10-1 表现出类似的广谱抑菌性。因此,试验筛选的菌株 Y10-1 对常见食源性病原菌的抑制效果处于较高水平,表明其具有广谱抑菌能力。综上,菌株 Y10-1 具有较强广谱抑菌性,是 1 株可用于食品加工领域潜在的益生菌。

表 3 融合魏斯氏菌 Y10-1 CFS 对水产品常见致病菌的抑菌作用

Table 3 Inhibitory effect of *Weissella confusa* CFS on common pathogenic bacteria in aquatic products

病原菌	抑菌圈直径/mm
<i>P. damsela</i>	19.92±0.59
<i>A. caviae</i>	20.50±0.42
<i>A. hydrophila</i>	20.43±0.18
<i>A. veronii</i>	20.39±0.86

2.4 融合魏斯氏菌 Y10-1 生长与拮抗 *V. parahaemolyticus* 活性曲线分析

如图 3 所示,该菌株在培养 4~16 h 期间处于对数生长期,培养 16 h 后逐渐过渡至稳定期。随着菌株在对数生长期内快速生长,发酵液的 pH 值在 16 h 时迅速下降至 3.6±0.2,20 h 时趋于稳定 3.2±0.1,表明该菌株具有较强的产酸能力;Shao 等^[29]报道的多个猪源乳酸菌在 6 h 时逐渐进入对数生长期,其生长速率低于菌株 Y10-1;于晨

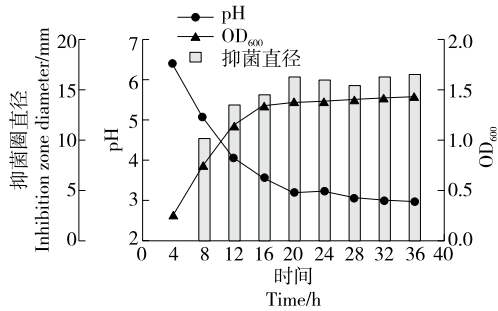


图3 菌株Y10-1生长及拮抗活性曲线

Figure 3 Time course of growth and antibacterial activity of strain Y10-1

等^[11]筛选的 *V. parahaemolyticus* 拮抗菌株在 24 h 时 pH 降至 4.1, 其产酸速率慢于菌株 Y10-1。表明菌株 Y10-1 的产酸能力较强, 生长力旺盛, 可以在短时间内迅速建立优势并发挥抑菌作用。

乳酸菌抑制食源性致病菌的生长主要是通过其代谢过程中合成的细菌素、有机酸、胞外多糖和过氧化氢等产物^[30-32]。菌株 Y10-1 在培养 8 h 时开始表现出对 *V. parahaemolyticus* 的抑菌作用(抑菌圈直径达(11.66±1.10) mm), 此时菌株 Y10-1 处于对数生长期, 生长速率和代谢速率旺盛。培养至 20 h 时, 菌株 Y10-1 进入稳定期, 抑菌活性也趋于稳定, 说明此时其拮抗性代谢产物可能已积累到较高水平。表明菌株 Y10-1 在生长至稳定期阶段, 逐渐积累具有拮抗活性的代谢产物, 且其抑菌能力与菌株的生长和代谢能力密切相关。

菌株经 24 h 发酵后 CFS 蛋白质量浓度为 1.2 mg/mL, 与其他魏斯氏菌属菌株相比, 试验菌株能产更多的蛋白以及对 *V. parahaemolyticus* 表现出更强的抑菌效果, 如 Kanjan 等^[33]报道的食蜜魏斯氏菌(*Weissella cibaria*) KY10 对 *V. parahaemolyticus* 抑菌直径为(16.3±0.7) mm, CFS 蛋白质量浓度为 0.9 mg/mL; Chen 等^[34]报道的希腊魏斯氏菌(*Weissella hellenica*)对 *V. parahaemolyticus* 的抑菌圈直径为(15.2±0.4) mm, CFS 蛋白浓度为 1.1 mg/mL。

2.5 融合魏斯氏菌 Y10-1 CFS 抑制 *V. parahaemolyticus* 的影响因素

2.5.1 酶敏感性试验 蛋白酶敏感性测定是评估抑菌活性物质特性的重要指标之一^[35]。由表 4 可知, 菌株 Y10-1 CFS 对木瓜蛋白酶、胰蛋白酶、蜗牛蛋白酶和碱性蛋白酶完全敏感, 经处理后活性完全丧失, 而对胃蛋白酶、中性蛋白酶和过氧化氢酶具有一定程度的敏感性。胃蛋白酶处理组的抗菌活性保留率显著高于其他蛋白酶处理组, 表明菌株 Y10-1 所产生的抑菌物质极可能是蛋白类物质, 尤其是细菌素。李悦^[36]将发酵上清液经木瓜蛋白酶和胰蛋白酶处理后, 抑菌活性率丧失 50% 左右, 初步确定该抑菌物质为蛋白质类; 潘果等^[37]从米酒样品中筛选出肠乳

表 4 酶处理对菌株 Y10-1 CFS 抑菌活性的影响[†]

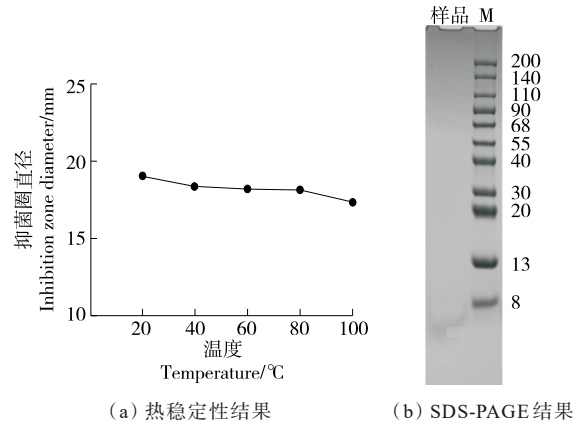
Table 4 Effect of enzyme treatment on the antibacterial activity of CFS of strain Y10-1

酶种类	抑菌圈直径/mm	活性丧失率/%
木瓜蛋白酶	—	100.00 ^a
胰蛋白酶	—	100.00 ^a
蜗牛蛋白酶	—	100.00 ^a
碱性蛋白酶	—	100.00 ^a
中性蛋白酶	13.24±0.65	27.57 ^b
过氧化氢酶	16.83±0.77	7.93 ^c
胃蛋白酶	17.42±0.33	4.70 ^d
对照组	18.28±0.26	0.00 ^e

[†] “—”为无抑菌作用; 小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

杆菌(*Limosilactobacillus fermentum*) PG-9, 该菌株发酵液经胃蛋白酶和胰蛋白酶发酵液完全失去抑菌活性, 经木瓜蛋白酶和蛋白酶 K 处理后则失去部分抑菌活性, 进一步验证起抑菌作用的主导成分为蛋白类物质。综上, 初步判定该抑菌物质主要为细菌素类, 该抑菌物质进入人体后, 可能会被人体内多种蛋白酶分解成小分子物质, 不会在人体内堆积^[38]。

2.5.2 热稳定性试验 由图 4 可知, 菌株 Y10-1 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的抑菌活性在 20~80 °C 处理 15 min 后保持稳定, 100 °C 处理后仍保留 91.21% 的活性, 与孙庆申等^[39]、Hu 等^[40]及 Qiao 等^[41]的研究结果相似。SDS-PAGE 结果显示, 菌株 Y10-1 所产抑菌物质的相对分子质量约为 5 左右。由于 Class II 型细菌素具有较高耐热特性, 相对分子质量多为 3~7^[32], 初步推断菌株 Y10-1 所合成的抑菌活性物质可能为 Class II 型细菌素。综上, 乳酸菌 Y10-1 所产抑菌物质具有较强的热稳定性, 这一特性使其能够在食品巴氏杀菌热处理过程中保持活性并能够有效发挥



(a) 热稳定性结果 (b) SDS-PAGE 结果

图 4 菌株 Y10-1 CFS 的热稳定性与 SDS-PAGE 结果
Figure 4 Thermal stability of strain Y10-1 CFS and SDS-PAGE results

抑菌作用,在食品热加工杀菌中具有良好的应用潜力^[42]。

2.5.3 pH 稳定性试验 由表 5 可知,菌株 Y10-1 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的抑制活性与 pH 呈显著负相关。在 pH 9.0 下仍维持(11.00±0.60) mm 的抑菌圈直径,而对照组(pH>3.0)活性完全丧失。值得注意的是,pH 2.0~9.0 范围内呈持续抑菌效应,但抑菌活性逐渐降低,表明该菌株对 *V. parahaemolyticus* 抑制作用产生的抗菌物质在酸性环境下抑菌效果较好。这种 pH 特性与细菌素的作用机理相吻合,Zacharof 等^[43]发现酸性条件下可以增强细菌素与病原菌膜磷脂双层的结合亲和力。而且相比于季红等^[44]报道的抑菌物质在 pH 7.0 时几乎丧失活性,王增光^[45]研究结果表明肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*) WJY-6 细菌素在 pH 3.0~5.0 酸性条件下对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)具有抑制作用,以及 Peng 等^[46]报道的 *Lactobacillus plantarum* SHY 21-2 细菌素在 pH 2.0~5.0 酸性条件下可发挥抑菌作用,菌株 Y10-1 所产的抑菌物质的酸碱稳定性更好。Chen 等^[34]报道 *W. hellenica* 所产细菌素在 pH 2.0~8.0 对 *V. parahaemolyticus* 具有抑菌活性,Singh 等^[47]报道从鱼肠中分离出的 *Weissella* sp. GMP12 细菌素在 pH 2.0~6.0 对溶藻弧菌(*Vibrio alginolyticus*)的生长表现出较强的抑制作用。相比之下,菌株 Y10-1 具有更宽的 pH 稳定范围。综上,在酸性条件下,融合魏斯氏菌产生的抑菌物质能发挥最佳的抑菌活性,且具有较宽的 pH 稳定性。

表 5 pH 对菌株 Y10-1 CFS 抑菌活性的影响[†]

Table 5 Effect of different pH levels on the bacterial inhibitory activity of strain Y10-1 CFS

pH	试验组抑菌圈直径/mm	对照组抑菌圈直径/mm
2.0	19.81±0.50	12.73±0.04
3.0	18.22±0.30	10.99±0.26
4.0	17.54±0.24	—
5.0	16.87±0.47	—
6.0	16.31±0.54	—
7.0	15.44±0.27	—
8.0	15.09±0.38	—
9.0	11.00±0.60	—
10.0	—	—

† “—”为无抑菌作用。

乳酸菌产生的抑菌物质在食品行业具有广泛的应用前景,如秦伟灵等^[48]报道德式乳杆菌(*Lactobacillus delbrueckii*) M2 和德式乳杆菌保加利亚亚种(*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*) M6 的抑菌物质在 pH 3.0~9.0 具有较好的稳定性,其在冷鲜肉、熟制鱼制品等低酸至中性防腐场景中具有良好的防腐效果。而

菌株 Y10-1 产生的抑菌物质在 pH 2.0~9.0 范围内能高效发挥作用,扩大了其在食品加工业中的应用范围。

2.6 融合魏斯氏菌 Y10-1 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的最小抑菌浓度

由图 5 可知,随着乳酸菌 Y10-1 CFS 浓度的增加,*V. parahaemolyticus* 的 OD₆₀₀ 逐渐减小,表明 *V. parahaemolyticus* 生长被抑制。当菌株 Y10-1 的 CFS 浓度≥5% 时,OD₆₀₀ 显著下降,培养基中无肉眼可见浑浊现象,说明在此浓度下 *V. parahaemolyticus* 生长被显著抑制,故乳酸菌 Y10-1 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 的 MIC 被确定为 5%。Liu 等^[49]报道的酸菜源棒状乳杆菌(*Lactobacillus coryniformis*) 7841 的 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 最小抑菌浓度为 10%,Shangguan 等^[50]报道副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*) L10 的 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 最小抑菌浓度为 6%,Woraprayote 等^[51]报道 *W. hellenica* BCC 7239 的 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 最小抑菌浓度为 6.25%,相比之下,融合魏斯氏菌 Y10-1 所产抑菌物质能在更低的抑菌浓度下对 *V. parahaemolyticus* 达到更好的抑制效果,表明其具备良好的应用潜力。

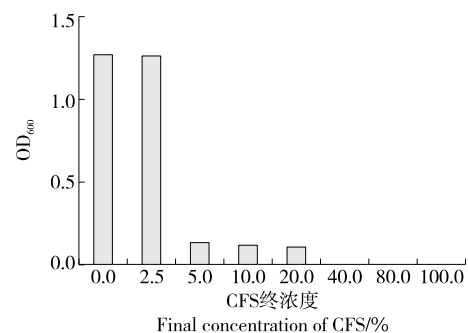


图 5 菌株 Y10-1 CFS 最小抑菌浓度结果

Figure 5 Results of the minimum inhibitory concentration of strain Y10-1 CFS

2.7 扫描电子显微镜分析

乳酸菌抑制病原菌增殖方式之一是通过合成细菌素和过氧化氢等次级代谢产物直接破坏细菌膜结构完整性来引发细胞裂解^[52]。由图 6 可知,未经菌株 Y10-1 CFS 处理的 *V. parahaemolyticus* 呈典型杆状,外表光滑且形态完整。经 1×MIC CFS 处理 4 h 后, *V. parahaemolyticus* 完整性开始发生改变,菌体表面出现褶皱及局部溶解现象; 2×MIC 处理导致细胞结构不完整性及细胞壁受损现象进一步加重,并出现变形和裂解现象;增至 3×MIC 时,细胞完整性完全丧失,细胞菌体完全被破坏和裂解。综上,随着乳酸菌 Y10-1 CFS 抑菌物质浓度的增加,对 *V. parahaemolyticus* 细胞结构的破坏作用更强,表现出更强的抑菌活性,与刘珊娜等^[26]的研究结果一致。

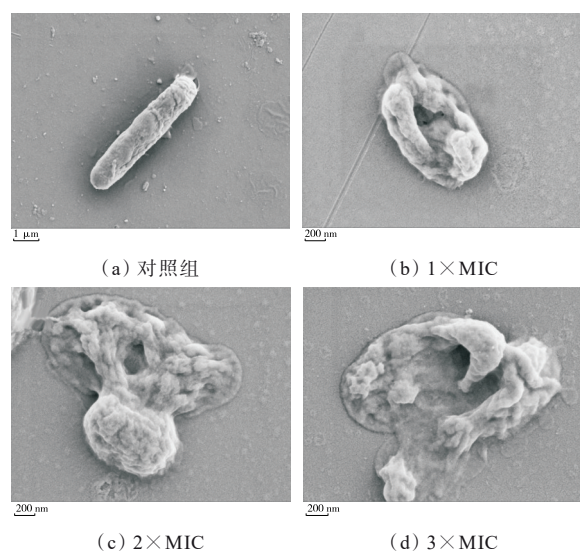


图6 菌株 Y10-1 CFS 对 *V. parahaemolyticus* 细胞结构的影响

Figure 6 Effect of strain Y10-1 CFS on *V. parahaemolyticus* cell structure

3 结论

从广西北部湾海鱼肠道中分离筛选出 1 株融合魏斯氏菌 Y10-1, 该菌株对副溶血弧菌增殖具有较强的抑制作用, 其抑菌圈直径可达 (18.54 ± 0.61) mm。酶敏感性试验显示, 木瓜蛋白酶、胰蛋白酶、蜗牛蛋白酶和碱性蛋白酶可完全消除菌株 Y10-1 CFS 的抑菌活性, 由此推测其主要活性成分为蛋白质。该菌株无细胞上清液在 pH 2.0~9.0、温度 ≤ 100 °C 范围内对副溶血弧菌具有显著抑制作用; 其最小抑菌浓度为 5%, 且在 3 倍最小抑菌浓度下, 副溶血弧菌细胞完全裂解。综上, 融合魏斯氏菌 Y10-1 在食品加工行业防腐保鲜具有较高的应用潜力。融合魏斯氏菌 Y10-1 的抑菌活性主要为蛋白类物质, 但其具体结构和作用机制尚未明析。后续将聚焦于活性物质的分离纯化与结构鉴定, 以及借助组学来揭示其抑菌机制。

参考文献

- [1] Teng L, Zou G, Zhou Y, et al. Phage controlling method against novel freshwater-derived *Vibrio parahaemolyticus* in ready-to-eat crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Food Research International, 2022, 162: 111986.
- [2] Han N, Mizan M F R, Jahid I K, et al. Biofilm formation by *Vibrio parahaemolyticus* on food and food contact surfaces increases with rise in temperature[J]. Food Control, 2016, 70: 161-166.
- [3] Su Y C, Liu C C. *Vibrio parahaemolyticus*: a concern of seafood safety[J]. Food Microbiology, 2007, 24(6): 549-558.
- [4] Sorée M, Kolpeczuk L, Hadjiev E, et al. Screening of marine

- lactic acid bacteria for *Vibrio parahaemolyticus* inhibition and application to depuration in Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. Journal of Applied Microbiology, 2023, 134(2): 1xac081.
- [5] Osei-Adjei G, Huang X X, Zhang Y Q. The extracellular proteases produced by *Vibrio parahaemolyticus*[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2018, 34(5): 68.
- [6] Zheng X S, Gao L, Yuan L, et al. Control of *Vibrio parahaemolyticus* in seafood using the combination of lytic phages and citric acid[J]. Foods, 2024, 14(1): 37.
- [7] 熊思瑞, 王龙宇, 王云峰, 等. 超高温瞬时灭菌对米酒品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 183-188, 218.
- Xiong S R, Wang L Y, Wang Y F, et al. Effect of ultra-high temperature transient sterilization on quality of rice wine[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 183-188, 218.
- [8] Broberg C A, Zhang L L, Gonzalez H, et al. A *Vibrio* effector protein is an inositol phosphatase and disrupts host cell membrane integrity[J]. Science, 2010, 329(5999): 1660-1662.
- [9] Niederhäusern S, Camellini S, Sabia C, et al. Antilisterial activity of bacteriocins produced by lactic bacteria isolated from dairy products[J]. Foods, 2020, 9(12): 1757.
- [10] Zhang F F, Zhou K, Xie F X, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria with antimicrobial abilities for aquaculture pathogens in vitro[J]. Archives of Microbiology, 2022, 204(12): 689.
- [11] 于晨, 杨露, 管峰, 等. 抑制副溶血性弧菌的乳酸菌筛选鉴定及其生物学特性研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 12-18.
- Yu C, Yang L, Guan F, et al. Screening, identification and biological characteristics of lactic acid bacteria inhibiting *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 12-18.
- [12] Hossain A, Habibullah-Al-Mamun M, Nagano I, et al. Antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and resistance genes in aquaculture: risks, current concern, and future thinking[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(8): 11054-11075.
- [13] 侯小艺, 王建辉, 邓娜, 等. 乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 232-240.
- Hou X Y, Wang J H, Deng N, et al. Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of fermented vegetables[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 232-240.
- [14] 陈靖, 周佳豪, 毛琪琪, 等. 产胞外多糖乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 26-31, 169.
- Chen J, Zhou J H, Mao Q Q, et al. Screening and identification of extracellular polysaccharide-producing lactic acid bacteria [J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 26-31, 169.
- [15] Field D, Ross R P, Hill C. Developing bacteriocins of lactic acid bacteria into next generation biopreservatives[J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 20: 1-6.
- [16] 陈梓琦, 汪彩云, 李紫宁, 等. 乳酸菌的生长特性及其功能性质与应用综述[J]. 农产品加工, 2020(12): 80-83.

- Chen Z Q, Wang C Y, Li Z N, et al. A review of the growth characteristics, functional properties and applications of lactic acid bacteria[J]. *Farm Products Processing*, 2020(12): 80-83.
- [17] 杨静, 马如慧, 杨智茜, 等. 2株乳酸菌的生长和潜在益生菌特性[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(2): 239-246.
- Yang J, Ma R H, Yang Z X, et al. Growth of two lactic acid bacteria strains and their potential probiotic characteristics[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2017, 43(2): 239-246.
- [18] Alvarez-Sieiro P, Montalbán-López M, MU D D, et al. Bacteriocins of lactic acid bacteria: extending the family[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(7): 2 939-2 951.
- [19] Lv C, Kong Q, Yu Z Y, et al. Medium optimization of three marine probiotics and their application in the culture of *Sebastes schlegelii*[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2025, 204: 107599.
- [20] Jyoti K, Avtar S, Nuntiya P, et al. Antibacterial potential of cell-free supernatants from *Liquorilactobacillus nagelii* and *Lactococcus garvieae* isolated from the gastrointestinal tract of Asian green mussel (*Perna viridis*) against foodborne pathogenic and spoilage bacteria[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025, 21: 101855.
- [21] 孙盛, 陈作国, 俞赟霞, 等. 产胞外多糖植物乳杆菌 WHH589 的免疫活性及其在发酵乳中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 43-50.
- Sun S, Chen Z G, Yu Y X, et al. The immunomodulatory activity of *Lactobacillus plantarum* WHH589 with extracellular polysaccharide-producing property and its application in fermented milk[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(13): 43-50.
- [22] 周龙霞, 郑学云, 薛锋, 等. 天山雪莲菌酸奶中菌株的分离及生理生化鉴定[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(18): 7 963-7 964.
- Zhou L X, Zheng X Y, Xue F, et al. Isolation and physiological-biochemical identification of bacterial strain from *Saussurea involucre* bacteria of yogurt[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(18): 7 963-7 964.
- [23] 杜静芳, 缪璐欢, 马欢欢, 等. 淡水鱼肠道中拮抗副溶血弧菌乳酸菌的筛选及鉴定[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(5): 168-175.
- Du J F, Miao L H, Ma H H, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria with antagonistic *Vibrio parahaemolyticus* derived from freshwater fish intestinal[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(5): 168-175.
- [24] 马国涵, 马欢欢, 吕欣然, 等. 大菱鲆肠道中广谱拮抗活性乳酸菌的筛选及其细菌素鉴定[J]. *食品科学*, 2019, 40(6): 159-165.
- Ma G H, Ma H H, Lü X R, et al. Screening for broad-spectrum antagonistic lactic acid bacteria from intestine of turbot and identification of bacteriocin produced by it[J]. *Food Science*, 2019, 40(6): 159-165.
- [25] 孙华迪, 蔡丽丽, 陈晓静, 等. 具有广谱抑菌特性的嗜酸乳杆菌细菌素活性研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 84-89.
- Sun H D, Cai L L, Chen X J, et al. Activity study of bacteriocin produced by *Lactobacillus acidophilus* with broad spectrum bacteriostasis[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 41(4): 84-89.
- [26] 刘珊珊, 李欣颖, 樊秀花. 无害李斯特菌生长特性及乳酸片球菌发酵上清液抑菌效果研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(4): 5-9.
- Liu S S, Li X Y, Fan X H. Growth properties of *Listeria innocua* and inhibitory effects of *Pediococcus acidilactici* culture supernatant[J]. *Food Science*, 2018, 43(4): 5-9.
- [27] Govindaraj K, Samayanpaulraj V, Narayanadoss V, et al. Isolation of lactic acid bacteria from intestine of freshwater fishes and elucidation of probiotic potential for aquaculture application[J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2021, 13(6): 1 598-1 610.
- [28] Dinçer E, Kivanç M. In vitro evaluation of probiotic potential of *Enterococcus faecium* strains isolated from Turkish pastırma [J]. *Archives of Microbiology*, 2021, 203(6): 2 831-2 841.
- [29] Shao Y, Wu X Y, Yu Z R, et al. Gut microbiome analysis and screening of lactic acid bacteria with probiotic potential in Anhui swine[J]. *Animals*, 2023, 13(24): 3 812.
- [30] Jiang H, Li P, Gu Q. Heterologous expression and purification of plantaricin NC8, a two-peptide bacteriocin against *Salmonella* spp. from *Lactobacillus plantarum* ZJ316[J]. *Protein Expression and Purification*, 2016, 127: 28-34.
- [31] Yu H J, Chen Y F, Yang H J, et al. Screening for *Lactobacillus plantarum* with potential inhibitory activity against enteric pathogens[J]. *Annals of Microbiology*, 2015, 65(3): 1 257-1 265.
- [32] Reuben R C, Roy P C, Sarkar S L, et al. Characterization and evaluation of lactic acid bacteria from indigenous raw milk for potential probiotic properties[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(2): 1 223-1 237.
- [33] Kanjan P, Kimtun A, Chaimongkol S, et al. Probiotic *Weissella cibaria* KY10 derived from digestive tract of healthy shrimp exhibits strong antibacterial effects against *Vibrio parahaemolyticus* causing AHPND in shrimp[J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53(7): 2 597-2 607.
- [34] Chen C, Chen X H, Jiang M, et al. A newly discovered bacteriocin from *Weissella hellenica* D1501 associated with Chinese Dong fermented meat (Nanx Wudl)[J]. *Food Control*, 2014, 42: 116-124.
- [35] 江宇航, 辛维岗, 徐美余, 等. 抑制嗜水气单胞菌乳酸菌的筛选、鉴定及抑菌作用[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42(1): 61-66.

- Jiang Y H, Xin W G, Xu M Y, et al. Screening, identification, and of lactobacteria inhibition effect of *Aeromonas hydrophila* [J]. Journal of Microbiology, 2022, 42(1): 61-66.
- [36] 李悦. 抑菌肽产生菌的筛选及产物特性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2008: 4-58.
- Li Y. Research on screening of bacteriocin-producing strain and characterization of the bacteriocin[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2008: 4-58.
- [37] 潘果, 王云飞, 钟忻桐, 等. 抗鼠伤寒沙门氏菌的乳酸菌细菌素生物学特性及其抑菌机制初步研究[J]. 饲料研究, 2024, 47(17): 115-120.
- Pan G, Wang Y F, Zhong X T, et al. Preliminary study on biological characteristics and inhibitory mechanism of *Lactobacillus* bacteriocins against *Salmonella typhimurium*[J]. Feed Research, 2024, 47(17): 115-120.
- [38] 王娜娜. 产细菌素乳酸菌的筛选及细菌素的分离纯化和特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016: 9-55.
- Wang N N. Screen of bacteriocin-producing lactic acid bacteria and purification & study on biological characteristics of bacteriocin[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016: 9-55.
- [39] 孙庆申, 王钰涵, 韩德权, 等. 酸菜中具有抑菌活性乳酸菌的分离鉴定及其产细菌素特性[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(4): 64-73.
- Sun Q S, Wang Y H, Han D Q, et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria with antibacterial activity in pickles and their bacteriocin production characteristics[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(4): 64-73.
- [40] Hu Y X, Liu X L, Shan C J, et al. Novel bacteriocin produced by *Lactobacillus alimentarius* FM-MM4 from a traditional Chinese fermented meat Nanx Wudl: purification, identification and antimicrobial characteristics[J]. Food Control, 2017, 77: 290-297.
- [41] Qiao Z, Chen J X, Zhou Q Q, et al. Purification, characterization, and mode of action of a novel bacteriocin BM173 from *Lactobacillus crustorum* MN047 and its effect on biofilm formation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(2): 1 474-1 483.
- [42] 胡美丽. 产细菌素乳酸菌的优选及在羊肉保鲜中的应用[D]. 石河子: 石河子大学, 2023: 11-40.
- Hu M L. Optimization of bacteriocin-producing lactic acid bacteria and its application in mutton preservation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023: 11-40.
- [43] Zacharof M P, Lovitt R W. Bacteriocins produced by lactic acid bacteria a review article[J]. APCBEE Procedia, 2012, 2: 50-56.
- [44] 季红, 吴正钧, 韩璿, 等. 植物乳杆菌 ST-III 细菌素类抑菌活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(7): 6-12.
- Ji H, Wu Z J, Han J, et al. Study on bacteriocin production of *Lactobacillus plantarum* ST-III [J]. Food Research and Development, 2013, 34(7): 6-12.
- [45] 王增光. 产细菌素乳酸菌筛选及其细菌素分离和理化特性的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023: 12-39.
- Wang Z G. Screening of bacteriocin-producing *Lactobacillus* and its bacteriocin isolation and physicochemical properties [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023: 12-39.
- [46] Peng S D, Song J J, Zeng W Y, 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 Technolog, 2021, 142: 110955.
- [47] Singh J K, Devi P B, Reddy G B, et al. Biosynthesis, classification, properties, and applications of *Weissella* bacteriocins[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1406904.
- [48] 秦伟灵, 彭欢, 王洁. 德式乳杆菌和德式乳杆菌保加利亚亚种抑菌特性研究及发酵条件优化与保鲜效果评价[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 38-51.
- Qin W L, Peng H, Wang J. Isolation, bacteriostatic properties, and preservative effects of lactic acid bacteria producing antimicrobial peptides from fermented food[J]. China Industrial Economics, 2025, 41(12): 38-51.
- [49] Liu H, Wang Y Y, Cao J J, et al. Antibacterial activity of cell-free supernatant produced by *Lactobacillus coryniformis* 7841 against *Vibrio parahaemolyticus* and its potential application in salmon preservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 214: 117033.
- [50] Shanguan W, Xie T, Zhang R, et al. Anti-biofilm potential of kefir-derived *Lactobacillus paracasei* L10 against *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Letters in Applied Microbiology, 2021, 73(6): 750-758.
- [51] Woraprayote W, Pumpuang L, Tosukhowong A, et al. Two putatively novel bacteriocins active against Gram-negative food borne pathogens produced by *Weissella hellenica* BCC 7293[J]. Food Control, 2015, 55: 176-184.
- [52] Vogel V, Spellerberg B. Bacteriocin production by beta-hemolytic streptococci[J]. Pathogens, 2021, 10(7): 867.