

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250523002

引用格式: 吴锦兰, 白云, 黄海, 等. 柳州酸笋中具有抑菌活性乳酸菌的筛选、鉴定及抑菌物质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 230–237.

WU JL, BAI Y, HUANG H, *et al.* Screening and identification of lactic acid bacteria with antibacterial activity from Liuzhou fermented bamboo shoots and analysis of the antibacterial substances [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 230–237. (in Chinese with English abstract).

# 柳州酸笋中具有抑菌活性乳酸菌的筛选、鉴定及 抑菌物质分析

吴锦兰<sup>1,2,3</sup>, 白云<sup>1</sup>, 黄海<sup>3,4</sup>, 崔娜<sup>1,2,3</sup>, 熊建文<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 柳州工学院食品与化学工程学院, 柳州 545616; 2. 柳州市螺蛳粉植物源性配料研究重点实验室, 柳州 545616; 3. 柳州市特色食品风味与品质控制工程技术研究中心, 柳州 545616; 4. 广西美申园食品科技集团有限公司, 柳州 545616)

**摘要:** **目的** 筛选酸笋中具有抑菌活性的优良乳酸菌并对其抑菌物质进行分析。**方法** 以柳州传统发酵酸笋为原料, 金黄色葡萄球菌和大肠杆菌为指示菌, 抑菌圈直径为评价指标, 利用牛津杯法对抑菌特性较高乳酸菌进行筛选, 并采用形态观察及分子生物学技术对其进行菌种鉴定, 最后分析 pH、温度、酶处理该菌株发酵上清液对其抗菌物质活性的影响。**结果** 从柳州传统发酵酸笋中共分离得到 26 株乳酸菌, 其中 10 株对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均具有抑菌活性, 且菌株 LZ-6 的抑菌能力最强, 抑菌圈直径均大于 15 mm; 经鉴定, 菌株 LZ-6 为发酵粘液乳杆菌(*Limosilactobacillus fermentum*)。菌株 LZ-6 产生的抗菌物质在只有在酸性条件下才能发挥良好抗菌活性且具有较好的热稳定性; 经蛋白酶处理后, 抗菌活性无显著变化( $P>0.05$ ), 表明发酵上清液中蛋白质没有抗菌作用。**结论** 该研究从柳州酸笋中筛选得到 1 株具有较好抑菌活性的发酵乳杆菌 LZ-6, 其抑菌物质是一种活性稳定、不受温度和酶影响的有机酸类物质。该研究获得的酸笋源乳酸菌可用于酸笋发酵和生物防腐剂领域, 且为抑菌物质分离、鉴定和抑菌机制研究奠定基础。

**关键词:** 酸笋; 乳酸菌; 抑菌活性; 筛选; 鉴定; 抑菌物质

## Screening and identification of lactic acid bacteria with antibacterial activity from Liuzhou fermented bamboo shoots and analysis of the antibacterial substances

WU Jin-Lan<sup>1,2,3</sup>, BAI Yun<sup>1</sup>, HUANG Hai<sup>3,4</sup>, CUI Na<sup>1,2,3</sup>, XIONG Jian-Wen<sup>1,2,3\*</sup>

收稿日期: 2025-05-23

基金项目: 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2025KY1159); 柳州工学院科学基金项目(2021KYJJ01, 2021KYJJ02); 广西酸笋发酵机理及复合发酵菌剂研究项目(20210715); 柳州工学院专创融合示范课程建设项目(2024SFK13); 柳州市职业教育教学改革课题项目(LZJ2024C034); 柳州工学院课程思政专项(2021JGK035)

第一作者: 吴锦兰(1990—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品微生物。E-mail: 285262385@qq.com

\*通信作者: 熊建文(1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微生物资源开发与利用。E-mail: sjxjw@163.com

(1. Department of Food and Chemical Engineering, Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou 545616, China; 2. Liuzhou Key Laboratory of Plant-derived Ingredients of Liuzhou Luosifen, Liuzhou 545616, China; 3. Liuzhou Special Food Flavor and Quality Control Research Center of Engineering Technology, Liuzhou 545616, China; 4. Guangxi Meishenyuan Food Technology Group Co., Ltd., Liuzhou 545616, China)

**ABSTRACT: Objective** To obtain excellent lactic acid bacteria with bacteriostatic activity from fermented bamboo shoots and analyze their antibacterial substances. **Methods** Using Liuzhou traditional fermented bamboo shoots as raw materials, *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* as indicator bacteria, and inhibition zone diameter as evaluation indicator, the Oxford Cup method was used to screen lactic acid bacteria with higher antibacterial properties. The strain was identified by morphological observation and molecular biological technique. Finally, the effects of pH, temperature and enzyme treatment on the antibacterial activity of the fermentation supernatant of the strain were analyzed. **Results** A total of 26 strains of lactic acid bacteria were isolated from Liuzhou traditional fermented bamboo shoots, among which 10 strains had antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, and strain LZ-6 had the strongest antibacterial activity, with a diameter of more than 15 mm for the inhibition zone. The strain LZ-6 was identified as *Limosilactobacillus fermentum*. The antibacterial substances produced by strain LZ-6 exhibit good antibacterial activity only under acidic conditions and had good thermal stability. After protease treatment, there was no significant change in antibacterial activity ( $P>0.05$ ), indicated that the protein in the fermentation supernatant had no antibacterial effect. **Conclusion** A fermented lactobacillus LZ-6 with good antibacterial activity is screened from Liuzhou traditional fermented bamboo shoots. Its antibacterial substances are organic acids with stable activity and are not affected by temperature and enzymes. The lactic acid bacteria derived from fermented bamboo shoots obtained in this study can be used in the fields of sour bamboo shoot fermentation and biological preservatives, and lay the foundation for the separation, identification and mechanism research of antibacterial substances.

**KEY WORDS:** fermented bamboo shoot; lactic acid bacteria; antibacterial activity; screening; identification; antibacterial substance

## 0 引 言

随着人们生活水平的不断提高和食品安全意识的日益增强, 挖掘安全、广谱、高效的生物抑菌剂具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。乳酸菌广泛存在于自然界中, 包括乳制品、发酵食品、肠道等环境中, 具有调节肠道菌群平衡、促进营养物质吸收和机体生长发育、提高人体免疫力等多种有益于人体健康的功能, 是公认的食品级安全微生物<sup>[4-5]</sup>。乳酸菌来源的新型抑菌剂, 因其具有生产成本低、安全性高、抑菌效果好等优点, 已成为当前研究热点之一<sup>[6-7]</sup>。余金凤等<sup>[8]</sup>从西藏牦牛乳曲拉中分离得到一株短乳杆菌, 该菌株对食品污染常见菌株具有抑菌效果, 在食品开发中有较好的应用价值。杨珍珠等<sup>[9]</sup>从鲜羊奶中筛选获得 3 株产细菌素的乳酸菌, 抑菌能力强, 具有益生菌特质及应用价值。徐云凤等<sup>[10]</sup>以内蒙古酸菜为原料, 从中分离得到一株植物乳杆菌, 对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均具有较强的抑菌效果, 在发酵食品生产和食品防腐保鲜等领域具有潜在的应用价值。

酸笋作为南方地区的传统发酵食材, 历史悠久, 也是柳州螺蛳粉的重要配菜之一。酸笋是以竹笋为原料, 利用

自然附着微生物发酵制作而成, 具有丰富微生物资源, 也是筛选功能菌的重要来源之一<sup>[11-12]</sup>。卢宏皓等<sup>[13]</sup>筛选得到一株酸笋源高产甘露醇异型发酵的柠檬明串珠菌 NM-12。熊建文等<sup>[14]</sup>从酸笋中筛选得到一株具有较高降解胆固醇能力的植物乳酸菌, 降解率达 54.27%。

关于酸笋多以加工工艺<sup>[15-16]</sup>、营养成分与风味<sup>[17-18]</sup>、微生物多样性和功能性<sup>[19-20]</sup>为研究重点, 然而现阶段针对酸笋中具抑菌性乳酸菌的研究报道相对较少。本研究从柳州酸笋中分离筛选出具有抑菌活性乳酸菌, 随后进行菌株鉴定, 最后分析 pH、温度、酶处理该菌株发酵上清液对其抗菌物质活性的影响, 为开发酸笋来源的优良乳酸菌作为生物防腐剂提供一定参考, 同时为其抑菌代谢产物的开发和应用奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

酸笋, 采购于广西柳州市; 金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) CGMCC1.89、大肠杆菌 (*Escherichia coli*) CGMCC1.2170, 购买于中国普通微生物

学菌种保藏管理中心。

碳酸钙、氢氧化钠(分析纯,成都金山化学试剂有限公司);过氧化氢酶、蛋白酶 K(生物试剂,广东环凯微生物科技有限公司);LB 培养基、MRS 培养基(生物试剂,上海博微生物有限公司)。

## 1.2 仪器与设备

BSC-1304 生物安全柜(苏州安泰空气技术有限公司);Genosens1880 凝胶成像仪(上海勤翔科学仪器有限公司);L9800 热循环仪(北京莱普特科学仪器有限公司);EX30 生物显微镜(舜宇光学科技有限公司);牛津杯(6 mm×8 mm×10 mm,北京普博斯生物科技有限公司)。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 乳酸菌的分离与纯化

参考文献[21]方法,对柳州酸笋中乳酸菌进行分离纯化,并编号、保存备用。

### 1.3.2 具有抑菌活性乳酸菌的筛选

(1)制备菌株发酵上清液:参考文献[22]方法,将分离得到的乳酸菌培养、离心、过滤后制备发酵上清液备用。

(2)测定菌株抑菌活性:参考文献[23]方法,以金黄色葡萄球菌和大肠杆菌为指示菌,以未接菌的 MRS 培养基作为对照。再采用牛津杯平板法,检测菌株发酵上清液的抑菌活性。

### 1.3.3 具有抑菌活性乳酸菌株的鉴定

(1)形态学观察:参考文献[24]方法,对目标菌株进行菌落和细胞形态观察。

(2)分子生物学鉴定:参考文献[25]方法,对目标菌株进行同源性分析和系统发育树构建。

### 1.3.4 抑菌物质分析

(1)过氧化氢排除实验:参考文献[26]方法并稍作修改。具体如下,将菌株发酵上清液用质量浓度为 1 mg/mL 的过氧化氢酶处理 2 h 后,按 1.3.2(2)的方法测定比较处理前后发酵上清液抑菌活性的变化。

(2) pH 对抑菌物质活性的影响:参考文献[26]方法并稍作修改。具体如下,用氢氧化钠溶液将发酵上清液 pH 调节 7.0,按 1.3.2(2)的方法测定比较处理前后发酵上清液抑菌活性的变化。

(3)温度对抑菌物质活性的影响:参考文献[26]方法并稍作修改。具体如下,将发酵上清液分别在 60、80、100 °C 水浴中处理 20 min,按 1.3.2(2)的方法测定比较处理前后发酵上清液抑菌活性的变化。

(4)蛋白酶对抑菌物质活性的影响:参考文献[26]方法并稍作修改。具体如下,将发酵上清液用质量浓度为 1 mg/mL 的蛋白酶 K 处理 2 h 后,按 1.3.2(2)的方法测定比较处理前后发酵上清液抑菌活性的变化。

## 1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,实验数据以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS 28.0 进行单因素方差分析( $P < 0.05$  表示差异显著)和 Excel 2016、Origin 2018 进行计算及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 酸笋中乳酸菌的分离

酸笋利用新鲜竹笋自身的微生物发酵而成,其中富含丰富的乳酸菌资源。钟源等<sup>[27]</sup>对广西酸笋微生物多样性进行了分析,发现乳杆菌属为酸笋的主要优势属,属于乳酸菌的一种。陈正培等<sup>[28]</sup>也成功分离得到 22 株酸笋来源乳酸菌。试验样品经涂布和多次纯化检验后,最终利用专门用于培养乳酸菌的 MRS-CaCO<sub>3</sub> 培养基从柳州酸笋中共分离得到 26 株形态均一的乳白色菌株,菌落周围都出现典型的溶钙圈(见图 1),且革兰氏染色反应为阳性、接触酶反应为阴性,初步判断分离得到的菌株为乳酸菌,并分别编号为: LZ-1~LZ-26。

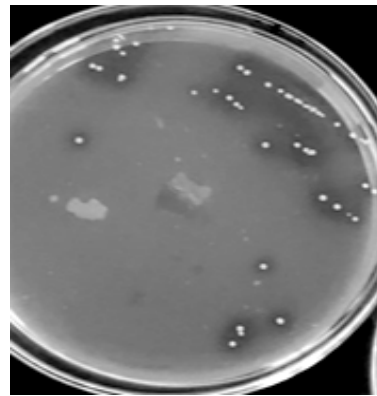


图 1 酸笋中乳酸菌的分离结果  
Fig.1 Isolation results of lactic acid bacteria in fermented bamboo shoots

### 2.2 具有抑菌活性乳酸菌的筛选

金黄色葡萄球菌和大肠杆菌分别是革兰氏阳性和阴性菌,是食品中两种常见致病菌,以它们为指示菌具有一定代表性。这 26 株乳酸菌对两种指示菌的抑制效果见表 1,结果显示菌株 LZ-2、LZ-5、LZ-6、LZ-8、LZ-10、LZ-12、LZ-13、LZ-16、LZ-22、LZ-23 均具有抑菌性,其中菌株 LZ-6 的抑菌效果最强,抑菌圈直径均达到 15 mm 以上。孙昊等<sup>[29]</sup>从农家卤水中分离出一株耐盐耐酸具抑菌活性的乳酸菌,其对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈分别为 7.6 mm 和 11 mm。侍宝路等<sup>[30]</sup>筛选得到一株高产细菌素乳酸菌,能有效抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等致病菌,抑菌圈分别为 10.40 mm 和 11.61 mm,均低于试验菌株 LZ-6 的抑菌活性。可见菌株 LZ-6 具有较好的抑菌效果(见图 2),因此选择菌株 LZ-6 作为后续实验所用菌。

表 1 26 株乳酸菌对指示菌的抑菌圈直径大小(n=3)  
Table 1 Diameter of inhibition zone of 26 strains of lactic acid bacteria against indicator bacteria (n=3)

实验菌	抑菌圈直径/mm	
	金黄色葡萄球菌	大肠杆菌
对照组	-	-
LZ-1	-	-
LZ-2	9.12±0.23 <sup>d</sup>	8.54±0.16 <sup>d</sup>
LZ-3	-	-
LZ-4	-	-
LZ-5	10.62±0.32 <sup>c</sup>	10.78±0.41 <sup>b</sup>
LZ-6	15.32±0.24 <sup>a</sup>	16.50±0.18 <sup>a</sup>
LZ-7	-	-
LZ-8	9.02±0.36 <sup>d</sup>	9.12±0.26 <sup>c</sup>
LZ-9	-	-
LZ-10	8.98±0.14 <sup>c</sup>	-
LZ-11	-	-
LZ-12	8.66±0.27 <sup>c</sup>	8.22±0.23 <sup>dc</sup>
LZ-13	-	8.56±0.25 <sup>d</sup>
LZ-14	-	-
LZ-15	-	-
LZ-16	11.12±0.24 <sup>b</sup>	9.72±0.25 <sup>c</sup>
LZ-17	-	-
LZ-18	-	-
LZ-19	-	-
LZ-20	-	-
LZ-21	-	-
LZ-22	10.36±0.19 <sup>cd</sup>	8.88±0.34 <sup>d</sup>
LZ-23	8.86±0.28 <sup>c</sup>	9.02±0.38 <sup>cd</sup>
LZ-24	-	-
LZ-25	-	-
LZ-26	-	-

注: -表示没有抑菌作用; 同列肩标字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

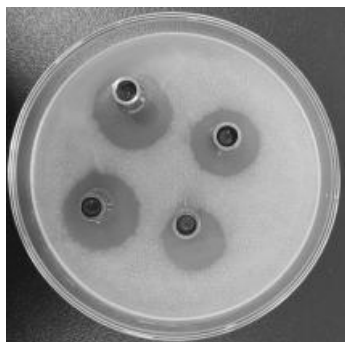
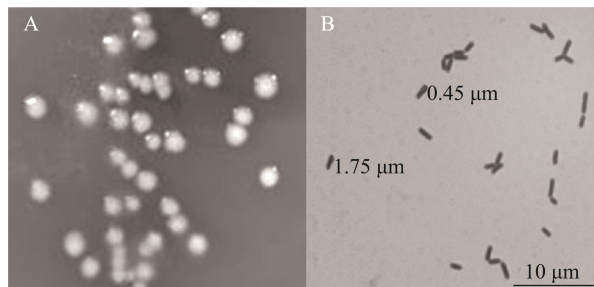


图 2 菌株 LZ-6 的抑菌效果  
Fig.2 Antibacterial effect diagram of strain LZ-6

### 2.3 具有抑菌活性乳酸菌株的鉴定结果

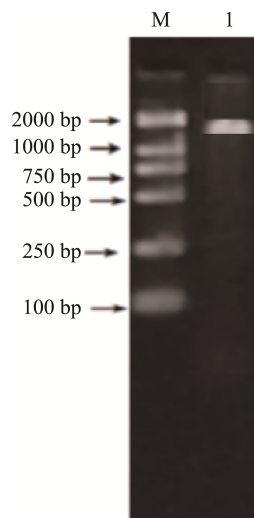
菌株 LZ-6 的菌落形态特征结果见图 3。由图 3A 可知, 菌株 LZ-6 培养后的菌落颜色呈乳白色、表面圆润光滑、不透明、凸起、边缘整齐; 进行革兰氏染色和显微观察其细胞形态, 由图 3B 可知, 菌株 LZ-6 的细胞呈短杆状、无芽孢、无鞭毛, 革兰氏染色为紫色呈阳性。



注: A. 菌株 LZ-6 的菌落形态; B. 菌株 LZ-6 的细胞形态。

图 3 菌株 LZ-6 的形态特征图  
Fig.3 Morphological characteristics of strain LZ-6

通过比较菌株的特定基因的序列, 可以更准确地鉴定菌株的种属, 可有效避免传统鉴定方法中的主观误判和误解。16S rDNA 基因具有对维持核糖体的结构和功能非常重要的高度保守区域, 以及包含不同物种特有的独特序列的可变区域, 是一种常用于分子生物学研究的基因, 可用于鉴定和分析细菌物种<sup>[31]</sup>。实验对菌株 LZ-6 的总 DNA 进行提取, 并以此为模板对菌株的 16S rDNA 进行聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)扩增, 电泳检测结果见图 4, 获得的片段大小在 1500 bp 左右, 其大小与预期结果一致。



注: M. DNA Marker ; 1. 菌株 LZ-6。

图 4 菌株 LZ-6 的 16S rDNA PCR 扩增  
Fig.4 PCR amplification for 16S rDNA of strain LZ-6

将菌株 LZ-6 的 16S rDNA 的 PCR 产物测序后, 进行同源性分析, 其系统发育树结果见图 5。从图 5 可以看出,

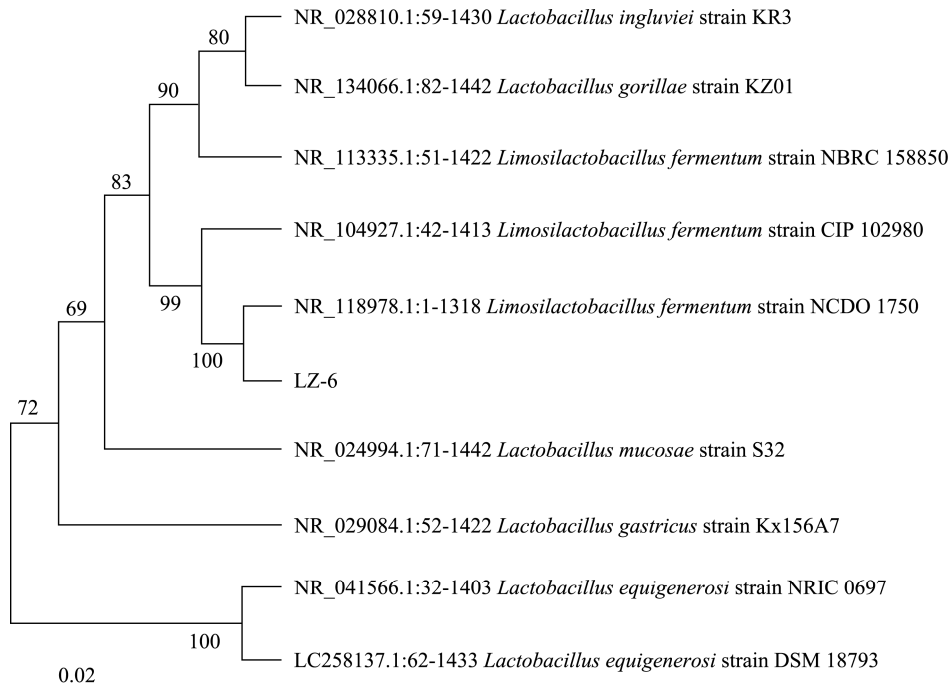


图 5 菌株 LZ-6 的系统发育树  
Fig.5 Phylogenetic tree of strain LZ-6

菌株 LZ-6 与发酵粘液乳杆菌 (*Limosilactobacillus fermentum*) 在同一分支中, 表示它们在系统进化树中具有较近的亲缘关系, 且同源性在 99% 以上, 表示它们之间的基因序列的相似性非常高, 具有很高的同源性。结合菌株 LZ-6 形态特征, 将菌株 LZ-6 鉴定为发酵粘液乳杆菌。廖义潇等<sup>[32]</sup>分离得到一株牛源乳酸菌, 鉴定为发酵粘液乳杆菌, 具有产酸、抑菌等优良的生物学特性。燕宪涛<sup>[33]</sup>研究发现, 发酵粘液乳杆菌 grx08 可以用于发酵参荷苓, 具有抗肥功效。此外还有研究发现, 发酵粘液乳杆菌在调节肠道菌群<sup>[34]</sup>、缓解幽门螺杆菌感染<sup>[35]</sup>、免疫调节<sup>[36]</sup>、抑制多种常见病原菌生长<sup>[37]</sup>等方面发挥着良好功效。可见发酵粘液乳杆菌具有较好的益生功能, 为潜在优良益生菌的候选菌株。

#### 2.4 pH、温度、酶对乳杆菌 LZ-6 抑菌物质活性的影响

乳酸菌可以通过产生过氧化氢、有机酸、蛋白质、小分子多肽类和细菌素等抑菌物质来抑制致病菌的繁殖和生长<sup>[38-39]</sup>。通过排除过氧化氢、酸碱稳定、热处理和蛋白酶的敏感性等试验可以对抑菌物质进行初步分析。在不同试验条件处理下对菌株 LZ-6 抗菌物质活性的影响结果见表 2 所示。

由表 2 可知, 在排除过氧化氢试验中, 与未处理组相比, 菌株 LZ-6 发酵上清液经过过氧化氢酶处理后其抑菌圈直径无明显变化, 其抑菌效果没有出现明显差异 ( $P > 0.05$ ), 该结果与曹珂珂等<sup>[40]</sup>的实验结果一致, 说明菌株 LZ-6 发

酵上清液中的过氧化氢不是起主要抑菌作用的因素, 排除了过氧化氢的干扰; 在酸碱稳定试验中, 菌株 LZ-6 发酵液经碱中和至 pH 为 7.0 时, 其发酵液的抑菌活性完全丧失, 该结果与向新等<sup>[41]</sup>的实验结果一致, 说明菌株 LZ-6 发酵上清液中的抑菌物质只有在酸性条件下才能发挥良好的抑菌作用, 推测菌株 LZ-6 所产生的抑菌物质可能为有机酸或一种酸依赖性物质<sup>[42]</sup>; 在热处理试验中, 菌株 LZ-6 发酵上清液分别在 60、80、100 °C 经高温处理后, 其抑菌活性均无显著变化, 该结果与周配东<sup>[43]</sup>的实验结果一致, 可见热处理不会破坏抑菌物质的活性, 具有较好的热稳定性; 在蛋白酶敏感试验中, 菌株 LZ-6 发酵上清液经蛋白酶 K 处理后对抑菌活性无明显变化 ( $P > 0.05$ ), 该结果与黄伟等<sup>[44]</sup>的实验结果一致, 表明菌株 LZ-6 生产的抑菌物质对蛋白酶不敏感, 不依赖于蛋白质结构。

不同来源的乳酸菌所产生的抑菌物质各不相同, 与其生境和代谢合成产物密切相关。杜贺超等<sup>[45]</sup>从韩国传统泡菜中筛选得到一株具有广谱抑菌活性的乳酸菌, 研究发现其抑菌物质活性菌对蛋白酶敏感, 具有较好热稳定性, 判断其抑菌物质为细菌素。武昌俊等<sup>[46]</sup>从安徽传统发酵酸奶中筛选出一株具有抑菌活性的乳酸菌, 并通过实验排除乳酸、乙酸和过氧化氢干扰后, 再经过蛋白酶处理后推测该乳酸菌产生的主要抑菌物质为蛋白类物质。李院等<sup>[47]</sup>从酱菜中筛选出 3 株能抑制青霉菌生长的乳酸菌, 研究发现这 3 株乳酸菌发酵液中的抑菌物质对 pH 和蛋白酶处理均表现出不同程度敏感性, 且对热处理稳定, 从而推测其抑菌物质的化学成分可能为小分子肽和/或有机酸。本研究

从传统发酵酸笋中分离得到的乳酸菌 LZ-6 通过一系列实验(过氧化氢酶处理、酸碱稳定性测试、热稳定性测试、蛋白酶敏感性测试)系统地分析推测得出其主要抑菌物质为含有热稳定的有机酸或一种酸依赖性物质, 可为其抑菌代谢产物的进一步开发和应用奠定一定基础。

表 2 不同试验条件处理下菌株 LZ-6 的抑菌活性( $n=3$ )  
Table 2 Antibacterial activity of strain LZ-6 under different conditions ( $n=3$ )

试验项目	处理方式	抑菌圈直径/mm	
		金黄色葡萄球菌	大肠杆菌
对照组	未处理	15.32±0.24	16.50±0.18
排除过氧化氢试验	过氧化氢酶	15.16±0.23	16.32±0.19
酸碱稳定试验	pH 3.0	15.46±0.16	16.62±0.42
	pH 7.0	-	-
热处理试验	60 °C、20 min	15.12±0.32	16.29±0.26
	80 °C、20 min	15.36±0.18	16.31±0.32
	100 °C、20 min	15.09±0.23	16.06±0.16
蛋白酶敏感试验	蛋白酶 K	15.11±0.18	16.36±0.26

注: -表示没有抑菌作用。

### 3 讨论与结论

发酵食品含有乳酸菌、酵母菌、醋酸菌等丰富的微生物资源, 是筛选益生菌的重要原材料之一。叶朋飞等<sup>[48]</sup>对自然富源酸笋中的益生菌进行了研究, 成功分离得到 4 株具有耐受性、抑菌活性和抗生素敏感性等特性的益生菌。酸笋作为我国南方地区的特色发酵食品, 由于其特色的风味深受当地人们喜爱, 目前有关酸笋中益生菌, 特别是抑菌方面特性的研究较少。

本研究以柳州传统发酵酸笋为原料, 成功分离出 26 株酸笋源乳酸菌, 通过抑菌能力检测, 确定 10 株乳酸菌对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均具有一定抑菌活性, 且菌株 LZ-6 的抑菌能力最强, 抑菌圈直径均大于 15 mm。将获得的菌株 LZ-6 测序结果在美国国家生物技术信息中心(National Center of Biotechnology Information, NCBI)上进行比对分析, 鉴定菌株 LZ-6 属于发酵粘液乳杆菌。大量研究表明发酵粘液乳杆菌能够在人和动物体内发挥益生作用, 在多个领域具有一定的应用潜力<sup>[32-36]</sup>。同时该菌株的获得补充和扩展了酸笋源益生菌的菌株资源, 有望作为酸笋发酵直投式优良菌株, 同时可为酸笋来源乳酸菌作为生物防腐剂和抗菌剂应用到食品工业中提供一定的理论参考。

为进一步了解菌株 LZ-6 代谢产物中抑菌物质的特性, 本研究从排除过氧化氢、排酸、热处理和蛋白酶的敏感性 4 个方面的试验对菌株 LZ-6 长生的抑菌物质进行分析。经过过氧化氢酶处理后, 抑菌活性无明显变化, 排除了过氧化氢为主要抑菌物质的可能。pH 调节至中性后, 菌株 LZ-6

发酵上清液的抑菌活性彻底丧失, 路则宝等<sup>[49]</sup>研究中菌株在 pH 调至 6.5 时抑菌活性已丧失, 杜贺超等<sup>[45]</sup>发现其研究的植物乳杆菌抑菌活性在 pH 为 7.0 时消失, 均与本研究结果相似。可见菌株 LZ-6 的主要抑菌物质应该为有机酸或一种酸依赖性物质。经蛋白酶处理后, 菌株 LZ-6 发酵液的抑菌活性均未受影响, 表现对蛋白酶不敏感, 初步排除了蛋白质等多肽类物质作为抑菌物质的可能。热处理发现, 菌株 LZ-6 所产生的抑菌物质活性并未被破坏, 对热不敏感, 具有热稳定性, 此结论与孙小涵等<sup>[26]</sup>发现的植物乳杆菌抑菌物质为有机酸的特性一致。综上出发酵乳酸菌 LZ-6 的主要抑菌物质为一种活性稳定、不受温度和酶影响的有机酸类物质。研究表明, 有机酸能够增强胃肠道消化功能<sup>[50]</sup>、促进营养物质吸收<sup>[51]</sup>、提高机体免疫力<sup>[52]</sup>。因此研究乳酸菌及其所产有机酸, 对开发新型绿色食品或药品添加剂具有很大的价值。后续可对该乳酸菌的抑菌物质进一步分离纯化及鉴定, 同时扩展其在食品防腐中的应用。

### 参考文献

- [1] IMAD E E, OMONIGHO S E, BABALOLA O O, *et al.* Lactic acid bacterial bacteriocins and their bioactive properties against food-associated antibiotic-resistant bacteria [J]. *Annals of Microbiology*, 2021, 71(1): 1-14.
- [2] 申润凡, 田影, 刘刚, 等. 基于高通量测序技术开发酱肘子天然香料抑菌剂[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(17): 166-175. SHEN R F, TIAN Y, LIU G, *et al.* Development of a natural antimicrobial agent for sauced pork knuckle based on high-throughput sequencing technology [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(17): 166-175.
- [3] 任洁, 谭中美, 田子豪, 等. 基于静电纺丝的生物活性物质封装体系及其在食品抑菌包装中的应用进展[J]. *食品科学*, 2025, 46(3): 246-256. REN J, TAN Z M, TIAN Z H, *et al.* Advances in electrospun encapsulation systems for bioactive substances and their applications in antimicrobial food packaging [J]. *Food Science*, 2025, 46(3): 246-256.
- [4] 刘祺琛, 康文丽, 魏雪, 等. 生殖道乳酸菌分离及益生功能评价[J]. *中国乳品工业*, 2025, 53(4): 28-36. LIU Q C, KANG W L, WEI X, *et al.* Isolation of lactic acid bacteria from the reproductive tract and evaluation of their probiotic functions [J]. *China Dairy Industry*, 2025, 53(4): 28-36.
- [5] 赵秋伟, 潘越, 王松涛, 等. 浓香型白酒酿造中乳酸菌的功能及相关研究进展[J]. *微生物学报*, 2025, 65(3): 871-882. ZHAO Q W, PAN Y, WANG S T, *et al.* Functions of lactic acid bacteria in the brewing of strong-flavor Chinese liquor and related research progress [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(3): 871-882.
- [6] LIU S N, HAN Y E, ZHOU Z J. Lactic acid bacteria in traditional fermented Chinese foods [J]. *Food Research International*, 2011, 44 (3): 643-651.
- [7] AYMERICH T, RODRIGUEZ M, GARRIGA M, *et al.* Assessment of the bioprotective potential of lactic acid bacteria against *Listeria monocytogenes* on vacuum-packed cold-smoked salmon stored at 8 °C [J]. *Food Microbiology*, 2019, 83(8): 64-70.
- [8] 余金凤, 向军, 周魏, 等. 一株曲拉源短乳杆菌的分离及其体外抑菌特性分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(12): 3953-3959. YU J F, XIANG J, ZHOU W, *et al.* Isolation of a *Lactobacillus casei* strain from cheese whey and analysis of its *in vitro* antibacterial properties [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(12): 3953-3959.

- [9] 杨珍珠, 潘栎琪, 迟海, 等. 羊奶源产细菌素乳酸菌筛选、鉴定及益生特性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(11): 71-77.  
YANG ZZ, PAN ZQ, CHI H, *et al.* Screening, identification of bacteriocin-producing lactic acid bacteria from sheep milk and study on their probiotic properties [J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(11): 71-77.
- [10] 徐云凤, 张欣, 褚泽军, 等. 一株具有高效抑菌活性乳酸菌的分离鉴定及生长特性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 12-14.  
XU YF, ZHANG X, CHU ZJ, *et al.* Isolation, identification of a lactic acid bacterium with high antibacterial activity and study on its growth characteristics [J]. Food and Machinery, 2021, 37(3): 12-14.
- [11] 林丽华, 卢安萍, 陈璟. 酸笋的风味物质及其发酵技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 147-153.  
LIN LH, LU ANP, CHEN J. Research progress on flavor compounds and fermentation technology of sour bamboo shoots [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 147-153.
- [12] 向爽, 张旭艺, 李雪梅, 等. 贵州酸笋中乳酸菌的筛选、鉴定及发酵条件对发酵酸笋感官的影响研究[J]. 现代食品, 2025(3): 79-83, 89.  
XIANG S, ZHANG XY, LI XM, *et al.* Screening and identification of lactic acid bacteria in Guizhou sour bamboo shoots and study on the effect of fermentation conditions on the sensory properties of fermented sour bamboo shoots [J]. Modern Food, 2025(3): 79-83, 89.
- [13] 卢宏皓, 刘昭明, 黄翠姬, 等. 酸笋中高产甘露醇型发酵乳酸菌的筛选及其发酵性能[J]. 中国调味品, 2022, 47(4): 32-36.  
LU HH, LIU ZM, HUANG CJ, *et al.* Screening of high mannitol-producing heterofermentative lactic acid bacteria in sour bamboo shoots and study on their fermentation performance [J]. China Condiment, 2022, 47(4): 32-36.
- [14] 熊建文, 桂扬, 周小玲, 等. 柳州酸笋中降胆固醇乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 中国调味品, 2021, 46(9): 74-80.  
XIONG JW, GUI Y, ZHOU XL, *et al.* Screening and identification of cholesterol-lowering lactic acid bacteria in Liuzhou sour bamboo shoots [J]. China Condiment, 2021, 46(9): 74-80.
- [15] 康林芝, 聂丹霞, 陈霖, 等. 不同加工工艺对酸笋品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 182-189.  
KANG LZ, NIE DX, CHEN L, *et al.* Effect of different processing technologies on the quality of sour bamboo shoots [J]. Food Industry Technology, 2024, 45(8): 182-189.
- [16] 林丽华, 陈璟. 微生物发酵对酸笋风味品质的影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 191-198.  
LIN LH, CHEN J. Research progress on effects of microbial fermentation on flavor quality of sour bamboo shoots and its application in bamboo shoot [J]. China Condiment, 2024, 49(8): 191-198.
- [17] 陈璟, 赵子龙, 林丽华. 酸笋的挥发性成分及其应用研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(8): 215-220.  
CHEN J, ZHAO ZL, LIN LH. Research progress on volatile compounds of sour bamboo shoots and their applications [J]. China Condiment, 2024, 49(8): 215-220.
- [18] 廖安, 杜海平, 程昊, 等. 两种酸笋主要成分、挥发性成分及抗氧化活性对比[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 145-151.  
LIAO AN, DU HP, CHENG H, *et al.* Comparison of major components, volatile compounds and antioxidant activity of two types of sour bamboo shoots [J]. Food and Machinery, 2024, 40(1): 145-151.
- [19] 秦鑫悦. 酸笋发酵过程中功能微生物菌群及其应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.  
QIN XY. Study on functional microbial communities and their applications during the fermentation of sour bamboo shoots [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [20] 黄图英, 班春媛, 吴庆标. 酸笋发酵过程的总酸度和革兰氏阳性菌数量变化研究[J]. 农村科学实验, 2024(5): 178-180.  
HUANG TY, BAN CY, WU QB. Study on the changes of total acidity and the number of gram-positive bacteria during the fermentation of sour bamboo shoots [J]. Rural Science Experiment, 2024(5): 178-180.
- [21] 孙宁, 雷敬玲, 吴晓青, 等. 自然发酵酸笋中乳酸菌的筛选鉴定及益生特性研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 63-68.  
SUN N, LEI JL, WU XQ, *et al.* Screening, identification of lactic acid bacteria in naturally fermented sour bamboo shoots and study on their probiotic properties [J]. China Brewing, 2020, 39(6): 63-68.
- [22] 杜东晓, 赵龙妹, 李旺, 等. 具有优良抑菌特性乳酸菌的筛选鉴定及活性物质检测[J]. 微生物学通报, 2022, 49(8): 3165-3178.  
DU DX, ZHAO LM, LI W, *et al.* Screening, identification of lactic acid bacteria with excellent antibacterial properties and detection of active substances [J]. Microbiology Bulletin, 2022, 49(8): 3165-3178.
- [23] 吴诗敏, 雷文平, 周辉, 等. 南山牧场牛乳中具有抑菌活性乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 中国酿造, 2019, 38(5): 108-112.  
WU SM, LEI WP, ZHOU H, *et al.* Screening and identification of lactic acid bacteria with antibacterial activity in Nanshan pasture cow milk [J]. China Brewing, 2019, 38(5): 108-112.
- [24] KERSTERS K, VANCANNEYT M. Bergey's manual of systematic bacteriology [M]. New York: Springer, 2005.
- [25] 吴锦兰, 付玉麟, 周小玲, 等. 酸笋中高产乳酸菌的筛选、鉴定及发酵条件优化[J]. 中国酿造, 2021, 40(1): 65-69.  
WU JL, FU YL, ZHOU XL, *et al.* Screening, identification of high lactic acid-producing lactic acid bacteria in sour bamboo shoots and optimization of fermentation conditions [J]. China Brewing, 2021, 40(1): 65-69.
- [26] 孙小涵, 孙洪浩, 陈秀秀, 等. 具有抑菌活性植物乳杆菌的筛选及抑菌物质的特性分析[J]. 养猪, 2020(6): 18-20.  
SUN XH, SUN HH, CHEN XX, *et al.* Screening of plant-derived *Lactobacillus* with antibacterial activity and analysis of the characteristics of antibacterial substances [J]. Pig Farming, 2020(6): 18-20.
- [27] 钟源, 张雅雯, 吕健曼, 等. 广西酸笋微生物多样性分析及其乳酸菌的特性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 1-9.  
ZHONG Y, ZHANG YW, LV JM, *et al.* Analysis of microbial diversity in Guangxi sour bamboo shoots and study on the characteristics of lactic acid bacteria [J]. China Condiment, 2023, 48(5): 1-9.
- [28] 陈正培, 蒋潮, 夏娟娟, 等. 柳州酸笋中降亚硝酸盐乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 中国酿造, 2020, 39(3): 26-31.  
CHEN ZP, JIANG C, XIA XR, *et al.* Screening and identification of nitrite-reducing lactic acid bacteria in Liuzhou sour bamboo shoots [J]. China Brewing, 2020, 39(3): 26-31.
- [29] 孙昊, 唐海峰, 刘欢, 等. 卤水中耐酸耐盐产细菌素乳酸菌的筛选[J]. 中国饲料, 2023(19): 37-44.  
SUN H, TANG HF, LIU H, *et al.* Screening of acid- and salt-tolerant bacteriocin-producing lactic acid bacteria in brine [J]. China Feed, 2023(19): 37-44.
- [30] 侍宝路, 王梓旭, 胡丹丹, 等. 产细菌素乳酸菌的筛选及其发酵牛奶的工艺优化[J]. 饲料工业, 2020, 41(9): 48-53.  
SHI BL, WANG ZX, HU DD, *et al.* Screening of bacteriocin-producing lactic acid bacteria and optimization of fermentation process for milk [J]. Feed Industry, 2020, 41(9): 48-53.
- [31] CLARRIDG JE. Impact of 16S rRNA gene sequence analysis for identification of bacteria on clinical microbiology and infectious diseases [J]. Clinical Microbiology Reviews, 2004, 17(4): 840-862.
- [32] 廖义潇, 杨泽敏, 李双, 等. 1株关岭黄牛瘤胃源发酵乳杆菌的分离鉴定及其生物学特性分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(20): 106-110, 143.

- LIAO YX, YANG ZM, LI S, *et al.* Isolation, identification of a *Lactobacillus* strain from the rumen of Guanling yellow cattle and analysis of its biological characteristics [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2023(20): 106–110, 143.
- [33] 燕宪涛. 发酵乳杆菌发酵参荷苓的抗肥胖功效及作用机制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- YAN XT. Study on the anti-obesity effects and mechanism of action of *Lactobacillus* fermentum fermented with ginseng, lotus leaf and poria [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [34] 孙晋涛, 顾鑫淑, 王金全, 等. 乳酸菌缓解伴侣动物肠道炎症的作用机制及研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2025, 52(5): 2442–2448.
- SUN JT, GU XS, WANG JQ, *et al.* Mechanism of lactic acid bacteria in alleviating intestinal inflammation in companion animals and research progress [J]. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2025, 52(5): 2442–2448.
- [35] 刘银辉, 余萍, 闵祥博, 等. 具有抗幽门螺杆菌能力的乳酸菌菌株筛选[J]. *中国微生态学杂志*, 2023, 35(12): 1394–1397.
- LIU YH, YU P, MIN XB, *et al.* Screening of *Lactobacillus* strains with anti-*Helicobacter pylori* activity [J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2023, 35(12): 1394–1397.
- [36] 罗茂妮. 具有缓解腹泻和调节免疫功效乳酸菌的筛选及其菌粉制备[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- LUO MN. Screening of lactic acid bacteria with anti-diarrheal and immune-regulating effects and preparation of their bacterial powder [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [37] 杜文静, 王强, 陈倩, 等. 具有生物保护潜力的耐低温乳酸菌筛选及其抑菌特性[J]. *食品科学*, 2025, 46(9): 121–129.
- DU W J, WANG Q, CHEN Q, *et al.* Screening of cold-tolerant lactic acid bacteria with bioprotective potential and their antibacterial properties [J]. *Food Science*, 2025, 46(9): 121–129.
- [38] 周恺颀. 广谱抑菌的酱源乳酸菌的筛选及其抑菌机制初探[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
- ZHOU KJ. Screening of broad-spectrum antibacterial lactic acid bacteria from soy sauce and preliminary exploration of their antibacterial mechanisms [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.
- [39] AASEN I, MORETRO T, KATLA T, *et al.* Influence of complex nutrients, temperature and pH on bacteriocin production by *Lactobacillus sakei* CCUG 42687 [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2000, 53(2): 159–166.
- [40] 曹珂珂, 王娣, 李妍. 1 株产广谱细菌素乳酸菌的筛选及其抑菌物质的特性[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(11): 88–91.
- CAO KK, WANG D, LI Y. Screening of a broad-spectrum bacteriocin-producing *Lactobacillus* strain and characterization of its antibacterial substances [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(11): 88–91.
- [41] 向新, 李晓然, 陈红, 等. 生殖道中具有抑菌活性乳酸菌的分离筛选及其抑菌物质分析[J]. *中国微生态学杂志*, 2013, 25(3): 272–276.
- XIANG X, LI XR, CHEN H, *et al.* Isolation and screening of *Lactobacillus* with antibacterial activity in the reproductive tract and analysis of its antibacterial substances [J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2013, 25(3): 272–276.
- [42] 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 JF, MIU LH, MA HH, *et al.* Screening and identification of *Lactobacillus* in the intestine of freshwater fish that antagonizes *Vibrio parahaemolyticus* [J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2017, 17(5): 168–175.
- [43] 周配东, 潘道东, 张玉千, 等. 产细菌素乳酸菌的筛选及其所产细菌素的特性[J]. *食品科学*, 2011, 32(17): 303–307.
- ZHOU PD, PAN DD, ZHANG YQ, *et al.* Screening of bacteriocin-producing *Lactobacillus* strains and characterization of the bacteriocins [J]. *Food Science*, 2011, 32(17): 303–307.
- [44] 黄伟, 张丽娟, 秦新政, 等. 贝莱斯芽胞杆菌 JK19 发酵液稳定性及抑菌物质初步分析[J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(1): 73–80.
- HUANG W, ZHANG LJ, QIN XZ, *et al.* Stability of fermentation broth of *Bacillus velezensis* JK19 and preliminary analysis of its antibacterial substances [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(1): 73–80.
- [45] 杜贺超, 蒋加进, 王楠楠, 等. 产抑菌物质乳酸菌的筛选及其抑菌特性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(21): 8543–8550.
- DU HC, JIANG JJ, WANG NN, *et al.* Screening of *Lactobacillus* producing antibacterial substances and study on their antibacterial properties [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(21): 8543–8550.
- [46] 武昌俊, 戴陈伟, 蔡标, 等. 一株安徽传统酸奶中产抑菌物质的乳酸菌的筛选与鉴定[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(17): 5779–5785.
- WU CJ, DAI CW, CAI B, *et al.* Screening and identification of a *Lactobacillus* strain producing antibacterial substances from traditional Anhui yogurt [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(17): 5779–5786.
- [47] 李院, 魏新元, 王静, 等. 抑制青霉菌乳酸菌的分离、鉴定及抑菌物质分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 150–155.
- LI Y, WEI XY, WANG J, *et al.* Isolation, identification of *Lactobacillus* inhibiting *Penicillium* and analysis of its antibacterial substances [J]. *Food Science*, 2015, 36(21): 150–155.
- [48] 叶朋飞, 刘静, 李秋达, 等. 富源酸菜源乳酸菌分离鉴定及益生特性研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(5): 87–91.
- YE PF, LIU J, LI QD, *et al.* Isolation, identification of *Lactobacillus* from Fuyuan sauerkraut and study on its probiotic properties [J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(5): 87–91.
- [49] 路则宝, 王靓贤, 姬志林, 等. 具抑菌活性乳酸菌筛选及抑菌活性物质分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(6): 170–173.
- LU ZB, WANG LX, JI ZL, *et al.* Screening of *Lactobacillus* with antibacterial activity and analysis of antibacterial substances [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(6): 170–173.
- [50] 郭惠梅, 吴薇, 芦亚娟, 等. 肠道有机酸和 pH 值在新生儿乳糖不耐受发病机制中的作用研究[J]. *医学理论与实践*, 2025, 38(4): 546–549, 554.
- GUO HM, WU W, LU YJ, *et al.* Study on the role of intestinal organic acids and pH in the pathogenesis of neonatal lactose intolerance [J]. *Medical Theory and Practice*, 2025, 38(4): 546–549, 554.
- [51] 曾雨秋, 刘士奇, 王贵平, 等. 复合有机酸对番鸭生产性能、抗氧化能力和免疫功能的影响[J]. *北方牧业*, 2024(16): 24.
- ZENG YQ, LIU SQ, WANG GP, *et al.* Effect of complex organic acids on the production performance, antioxidant capacity and immune function of partridges [J]. *Northern Animal Husbandry*, 2024(16): 24.
- [52] 李泽青, 刘正群, 于海霞, 等. 复合有机酸对断奶仔猪生长性能、营养物质表观消化率、抗氧化能力及肠道健康的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(23): 26–29.
- LI ZQ, LIU ZQ, YU HX, *et al.* Effect of complex organic acids on the growth performance, apparent digestibility of nutrients, antioxidant capacity and intestinal health of weaned piglets [J]. *Feed Research*, 2021, 44(23): 26–29.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)