DOI:10.12441/spyswjs.20250819001 [文章编号] 1673-1689(2026)01-0109-12

云南傣族地区酸菜中发酵乳酸菌的筛选及鉴定

王 蕊 张加稳 张联琴 陈 娴 陈 艳 左 诚 李丽鑫 刁玉华*

(昆明市食品药品检验所,云南 昆明 650032)

摘要:【目的】筛选适用于酸菜发酵的乳酸菌。**【方法】**以云南傣族地区传统发酵酸菜为研究对象,分离纯化乳酸菌,并对其发酵性能(亚硝酸盐降解力、产酸能力、耐酸性、耐盐生长能力)、抑菌性、药物敏感性、溶血性和氨基酸脱羧酶活性等特性进行研究,以确定优势菌株。**【结果】**从40份酸菜样本中共分离出208株乳酸菌。通过亚硝酸盐降解能力的初步筛选,获得20株高效菌株,其中15株经16S rDNA分子鉴定为植物乳植杆菌,2株为短乳杆菌,1株为发酵乳杆菌,1株为食窦魏斯氏菌,1株为戊糖乳杆菌。经亚硝酸盐复筛试验,有5株菌降解率在95%以上,4株菌产乳酸质量浓度高达21 g/L。其中菌株D8的亚硝酸盐降解率为(98.42±0.45)%,发酵24 h后,pH下降至3.63±0.05,产酸量高达(22.65±0.05) g/L;在质量分数为8%的NaCl溶液中,其OD_{600}值达2.002±0.012;在pH=3的溶液中,其OD_{600}值为0.268±0.038,表现出了良好的耐酸、耐盐生长特性。菌株D8对大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门菌的抑菌圈直径分别为(18.40±0.08)、(19.36±0.24)、(16.52±0.57) mm,抑菌效果优越。所有菌株均无溶血活性,且精氨酸、赖氨酸、鸟氨酸脱羧酶活性试验结果均为阴性,对大部分抗生素敏感。**【结论】**菌株D8是适用于酸菜发酵的优势菌株。

关键词:云南傣族地区;酸菜;发酵乳酸菌;筛选;鉴定

Screening and Identification of Strains of Lactic Acid Bacteria for Fermentation from Suancai in the Dai Ethnic Region of Yunnan

*WANG Rui ZHANG Jiawen ZHANG Lianqin CHEN Xian CHEN Yan ZUO Cheng LI Lixin DIAO Yuhua**

(Kunming Institute of Food and Drug Control, Kunming 650032, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to screen the strains of lactic acid bacteria (LAB) suitable for Suancai fermentation. [**Method**] Traditional fermented Suancai from the Dai ethnic region of Yunnan was used as the research samples for the isolation and purification of LAB. The purified isolates were evaluated for fermentation characteristics, including nitrite degradation, acid production, acid resistance, and salt tolerance. Additionally, the antimicrobial activity, antibiotic susceptibility, hemolytic activity, and amino acid decarboxylase activity were assessed to identify dominant strains. [**Result**] A total of 208 LAB strains were isolated from 40 Suancai samples. Preliminary screening based on nitrite degradation identified 20 strains with high efficiency, and 16S rDNA sequencing identified 15 strains of *Lactobacillus plantarum*, 2 strains of *Levilactobacillus brevis*, 1 strain of *Limosilactobacillus fermentum*, 1 strain of *Weissella cibaria*, and 1 strain of *Lactiplantibacillus pentosus*. The secondary screening based on nitrite degradation revealed 5 strains with nitrite degradation efficiencies >95%, as well as 4 strains producing lactic acid at mass concentrations higher than 21 g/L. Among them, strain D8 demonstrated the nitrite degradation rate reaching (98.42±0.45)%, decreasing the pH to 3.63±0.05 and producing

基金项目:云南省市场监督管理局科技计划项目(2024YSJK17)。

通信作者:刁玉华(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事食品安全与质量控制研究。E-mail:359915491@qq.com

收稿日期:2025-08-19 **修回日期:**2025-09-19

lactic acid as high as (22.65±0.05) g/L after 24 h of fermentation. Additionally, the OD_{600} value of the strain reached 2.002±0.012 in a NaCl solution with the mass fraction of 8% and 0.268±0.038 in a solution with pH 3, indicating excellent acid and salt tolerance. Strain D8 showed the inhibition zone diameters of (18.40±0.08) mm against *Escherichia coli*, (19.36±0.24) mm against *Staphylococcus aureus*, and (16.52±0.57) mm against *Salmonella typhimurium*, indicating remarkable antimicrobial performance. All the strains were non-hemolytic and tested negative for arginine, lysine, and ornithine decarboxylase, and susceptible to most antibiotics. [**Conclusion**] Comprehensive evaluation suggests strain D8 as the dominant strain for Suancai fermentation.

Keywords: Dai ethnic region of Yunnan; Suancai; lactic acid bacterium for fermentation; screening; identification

傣族为云南地区特有少数民族，其聚居地德宏傣族景颇族自治州和西双版纳傣族自治州属热带季风气候，孕育了丰富的物种。傣族人民普遍喜食酸菜等开胃食品，酸味更是傣味食品必不可少的灵魂。气候、原材料、制作工艺及饮食文化等的差异使得酸菜中乳酸菌在系统发育过程中，可能向不同方向进化并造成其表型及基因的多样性，从而导致酸菜中乳酸菌的差异。这为优质发酵乳酸菌资源的挖掘与利用提供了丰富的样本资源。传统酸菜是以蔬菜为原料，利用微生物自然发酵的冷加工食品[1]。酸菜中富含维生素、矿物质、有机酸和乳酸菌[2]，乳酸菌在酸菜的发酵体系中发挥主导作用。其发酵产生的酸、醇、酯等呈味物质，赋予了酸菜特有的风味及口感[3]。乳酸菌代谢产生的乳酸和细菌素等物质可以抑制发酵体系中腐败菌的生长[4]。乳酸菌除了对泡菜的风味有重要影响外，在发酵中也有各种益生作用，如高产酸能力[5]、抗氧化[6]、降解亚硝酸盐[7]、产γ-氨基丁酸[8]和降解生物胺[9]，并可产生多种有益物质。随着对大健康的重视，植物源乳酸菌已引起行业内的广泛关注[10]。

传统酸菜在发酵初期产生的硝酸盐还原酶会将蔬菜本身含有的硝酸盐还原为亚硝酸盐[11]。此外，传统发酵周期相对较长、生产效率低，由于发酵过程菌群组成复杂，易受外源性腐败微生物的污染，导致腐烂、霉变，影响酸菜的风味[12]，从而导致酸菜产品质量不可控[13]。在酸菜发酵工艺中，乳酸菌的选择直接影响产品的最终品质与风味特性，其作为核心发酵剂具有不可替代的功能价值。筛选出具有优良发酵性能的菌株是接种发酵过程的重要部分[14]，而乳酸菌的产酸和降解亚硝酸盐能力是应用于发酵蔬菜的重要指标[12]。故本研究以云南特有少数民族地区——德宏傣族景颇族自治州和西双版纳傣族自治州地区的酸菜样品为研究对象，筛选具有高效降解亚硝酸盐能力、抑菌效果较好、产酸速率快且能耐酸、耐盐生长的优质菌株，旨在为酸菜生产提供优质发酵菌株。

1 材料与方法

1.1 材料

采集自云南省德宏傣族景颇族自治州和西双版纳傣族自治州传统自制发酵酸菜40份，无菌采样后置于无菌袋中，4 ℃保存，尽快带回实验室检测。

1.2 试剂

MRS琼脂培养基、MRS肉汤培养基、质量分数3%过氧化氢还原酶试剂盒、革兰氏染色液和赖氨酸、鸟氨酸、精氨酸脱羧酶生化鉴定管以及氨基酸脱羧酶对照生化鉴定管：广东环凯微生物科技有限公司；血平板琼脂、平板计数琼脂（PCA）、胰蛋白胨大豆琼脂（TSA）：北京陆桥技术股份有限公司；$CaCO_3$、NaCl、$NaNO_2$、盐酸萘乙二胺、对氨基苯磺酸：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；HCl：优级纯，国药集团化学试剂有限公司；NaOH标准溶液：深圳市博林达科技有限公司；鼠伤寒沙门菌（*Salmonella typhimurium*）ATCC14028：美国典型培养物保藏中心；大肠埃希氏菌（*Escherichia coli*）CICC10350、金黄色葡萄球菌亚种（*Staphylococcus aureus subspecies*）CICC10306：中国工业微生物菌种保藏管理中心。

1.3 仪器与设备

显微镜：DM500型，徕卡显微系统（上海）贸易有限公司；高压蒸汽灭菌锅：MLS-3781L-PC型，日本Panasonic公司；紫外-可见分光光度计：Cary60型，美国Agilent公司；生化培养箱：SPX-250-II型，上海恒跃医疗器械有限公司；电子天平：AL104型，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；PH计：

S220K型，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；电热恒温干燥箱：BGZ-146型，上海博迅实业有限公司；生物安全柜：HFsafe-1800LCA2型，力新仪器（上海）有限公司；高速离心机：Allegrax-30R型，美国Beckman公司。

1.4　方法

1.4.1　乳酸菌的分离纯化

无菌操作移取酸菜固液混合物25 g于225 mL质量分数为0.85%的无菌生理盐水中，振荡摇匀，从1∶10的稀释液中吸取1 mL于9 mL无菌生理盐水中，振荡混匀，制成1∶100的稀释液，依此方法对样品进行10倍梯度稀释，取1×10^{-2}~1×10^{-6}梯度稀释液100 μL，涂布于含质量分数1.5% $CaCO_3$的MRS培养基上，于36 ℃恒温培养箱中倒置厌氧培养48 h。从MRS-$CaCO_3$培养基上选取有溶钙圈的单菌落，依据菌落形态、菌落大小、颜色、透明度、表面光滑度、边缘形状、湿润程度、表面是否凸起或凹陷等选取不同的菌落，在MRS培养基上分离纯化3次。经镜检确认为无污染、革兰氏阳性、过氧化氢酶阴性的菌落可初步鉴定为乳酸菌，随后将其保藏于含体积分数20%甘油的MRS液体培养基中，放置在-80 ℃冰箱中冷冻保存。

1.4.2　降解亚硝酸盐乳酸菌的筛选

1）初筛：将纯化后的菌株活化，按照接种体积分数2%接入10 mL MRS液体培养基中（含200 mg/L亚硝酸盐，pH 6.4），36 ℃厌氧培养24 h。于4 000 r/min、4 ℃离心5 min，取2 mL上清液，依次加入等体积对氨基苯磺酸溶液（避光反应5 min）及1 mL盐酸萘乙二胺溶液（避光反应15 min）。根据显色强度筛选20株颜色较浅的菌株进入复筛。

2）复筛：初筛菌株经3代活化后，制备OD_{600}值=1的菌悬液，以接种体积分数2%转接至MRS液体培养基中，36 ℃厌氧培养24 h。将初筛所得菌株活化3代，制成OD_{600}值=1的菌悬液。按初筛相同操作进行接种和培养。分别培养12、24 h，采用标准曲线法进行$NaNO_2$定量分析，以未接种菌株的$NaNO_2$培养基作为空白对照，通过降解率计算评估各菌株的亚硝酸盐清除能力，从而筛选出高效菌株。$NaNO_2$质量浓度的测定参照GB 5009.33—2025中的盐酸萘乙二胺法[15]。

1.4.3　乳酸菌产酸速度和产酸量的测定

初筛菌株经3代活化后，制备OD_{600}值=1的菌悬液，以接种体积分数2%转接至MRS液体培养基，36 ℃厌氧培养24 h。分别于12 h和24 h测定培养液pH。依据GB 12456—2021中的滴定法测定产酸量[16]，结果以乳酸质量浓度计。

1.4.4　乳酸菌耐酸、耐盐生长测定

分别用HCl、NaOH将MRS液体培养基pH精确调至2.0、3.0、4.0、5.0、6.0。将上述活化3代的菌株制成OD_{600}值=1的菌悬液，按接种体积分数2%接入上述不同pH的MRS肉汤培养基中，同时以相同体积分数接种于含质量分数2%、4%、6%、8%、10% NaCl的MRS肉汤培养基中。于36 ℃恒温培养箱中厌氧培养24 h，用紫外-可见分光光度计测定各菌株发酵液的OD_{600}值。筛选出耐酸、耐盐性能优良的乳酸菌。

1.4.5　乳酸菌抑菌性能测定

1）指示菌菌悬液的制备：将大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门菌标准储备菌株活化2代后划线于TSA平板，36 ℃培养24 h。挑选单菌落，用质量分数0.85%的灭菌生理盐水稀释成1×10^8 CFU/mL的菌悬液，于4 ℃保存备用。

2）乳酸菌菌株无细胞上清液的制备：将乳酸菌菌株接种于10 mL MRS肉汤中活化3代，调整菌悬液OD_{600}值=1，按体积分数2%接种于10 mL MRS肉汤中，36 ℃恒温培养箱中厌氧培养18 h，4 000 r/min离心5 min，取上清液过0.22 μm针头式过滤器，即为乳酸菌无细胞上清液。

3）抑菌性能测定：采用牛津杯法进行测定。在培养皿内分区摆放好已灭菌的直径为6 mm的牛津杯，向培养皿中倾注25 mL灭菌PCA培养基，静置30 min，再用无菌镊子将牛津杯移除。分别吸取200 μL 3种指示菌菌悬液，均匀涂布于PCA培养基表面，待其充分吸收后，用移液枪在孔中注入200 μL无细胞上清液，4 ℃扩散1 h，36 ℃培养24 h，用游标卡尺测定抑菌圈直径。

1.4.6　乳酸菌药物敏感性试验

采用纸片扩散法，将菌株活化3代，将菌悬液的浓度调整为1×10^8 CFU/mL，取100 μL均匀涂布于MRS琼脂平板。待菌液吸收后，在培养基表面等距放置3张药敏纸片，36 ℃培养24 h后测定抑菌圈直径，并依据微生物药物敏感性试验执行标

准进行药物敏感性判定。

1.4.7 乳酸菌溶血性测试

参考 Motey 等[17]的方法。将 3 代活化后的乳酸菌与金黄色葡萄球菌（对照）分别接种至血琼脂平板，36 ℃培养 48 h 后观察溶血活性。若菌落周围无任何变化、没有溶血环，说明红细胞未被破坏，为 γ 溶血；若菌落周围形成较窄的草绿色溶血环，说明红细胞被部分破坏，为 α 溶血；若菌落周围出现较宽的透明溶血环，说明红细胞完全溶解，为 β 溶血。

1.4.8 乳酸菌氨基酸脱羧酶活性试验

依据产品说明书，将各乳酸菌活化后划线接种于 MRS 平板上，于 36 ℃培养 48 h。将新鲜菌苔用质量分数 0.85% 无菌生理盐水稀释至 0.5 McFarland（约 1×10^8 CFU/mL），各吸取 2 滴菌悬液至赖氨酸、鸟氨酸、精氨酸脱羧酶生化鉴定管，同时以氨基酸脱羧酶为对照管。36 ℃培养箱中培养 24 h，依据生化鉴定管使用说明观察颜色并记录结果。

1.4.9 乳酸菌菌株鉴定

将纯化得到的单菌落送至成都罗宁生物科技有限公司进行 16S rDNA 鉴定，提取乳酸菌 DNA，之后用引物 27F（5′-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3′）和 1492R（5′-TACGACTTAACCCCAATCGC-3′）进行 PCR 扩增。用琼脂糖凝胶电泳法检测 PCR 产物并进行测序，将测序结果提交至 NCBI 进行 BLAST 同源性比对。

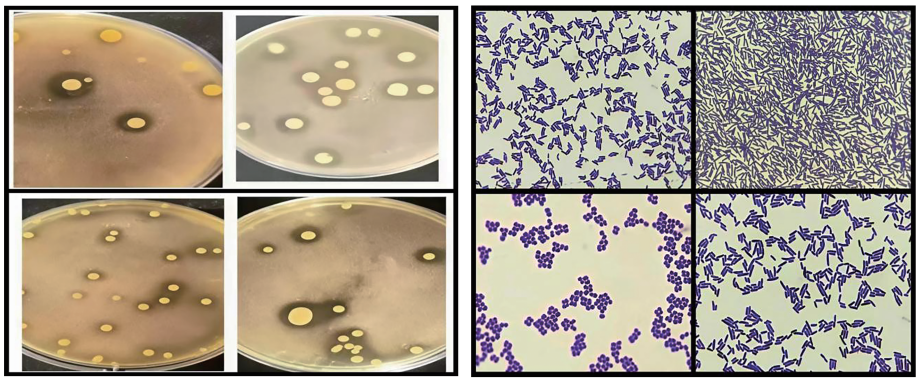
1.5 数据分析

每组试验重复测定 3 次，结果以平均值±标准差表示。通过 SPSS 27.0 统计软件进行方差分析及显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 乳酸菌分离纯化及降解亚硝酸盐乳酸菌筛选结果

乳酸菌代谢产生的有机酸可溶解 MRS-$CaCO_3$ 培养基中的 $CaCO_3$，形成透明溶钙圈，如图 1（a）所示。从酸菜样品中分离纯化获得 236 株具有明显溶钙圈的菌株。如图 1（b）所示，经革兰氏染色和过氧化氢酶试验（阴性）验证，208 株初步确认为乳酸菌。在亚硝酸盐初筛试验中，亚硝酸盐与对氨基苯磺酸发生重氮化反应，生成重氮盐，随后重氮盐与盐酸萘乙二胺偶合，形成紫红色偶氮化合物[18]，该化合物的颜色深浅与亚硝酸盐质量浓度呈正比。通过显色反应筛选出颜色较浅的 20 株乳酸菌，将德宏傣族景颇族自治州的菌株编号定义为 D1~D10，西双版纳傣族自治州的菌株编号定义为 X1~X10，用于后续优势菌株的筛选。



(a) 产溶钙圈的菌落　　(b) 乳酸菌的镜检图片

图 1 溶钙圈及镜检结果

Fig. 1 Calcium-dissolving zone and microscopic examination images

亚硝酸盐是发酵蔬菜加工过程中易蓄积的有害物质，研究发现，我国居民从饮食中摄入的 80% 以上的硝酸盐和亚硝酸盐均来自蔬菜及其发酵制品。过量摄入可在人体内转化为强致癌物 *N*-亚硝胺，增加胃癌、食道癌等疾病的患病风险。在酸菜发酵初期，硝酸盐可被某些微生物转化为亚硝酸盐；随着发酵的进行，乳酸菌成为优势菌群，亚硝酸盐逐渐被降解[19]。研究表明，乳酸菌通过酸性

环境和酶促反应双重途径可有效降低发酵蔬菜中亚硝酸盐质量浓度，且目前主要通过接种特定发酵剂实现亚硝酸盐的定向调控[20]。因此，筛选具有高效降解亚硝酸盐能力的乳酸菌菌株，并将其应用于酸菜发酵过程，对提升食品安全具有重要意义。由表1可知，发酵12 h后，除菌株D1、X1、X9外，其余菌株亚硝酸盐降解率均在80%以上，表现出了较好的亚硝酸盐降解潜力。发酵24 h后，20株乳酸菌菌株均具有良好的降解亚硝酸盐能力，且降解率均在85%以上，但不同乳酸菌菌株对亚硝酸盐的降解能力存在差异。通过16S rDNA鉴定初筛出来的菌株，其中15株为植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*），2株为短乳杆菌（*Levilactobacillus brevis*），1株为发酵乳杆菌（*Limosilactobacillus fermentum*），1株为食窦魏斯氏菌（*Weissella cibaria*），1株为戊糖乳杆菌（*Lactiplantibacillus pentosus*）。其中有75%为植物乳植杆菌，说明相较于其他乳酸菌，植物乳植杆菌在降解亚硝酸盐方面表现更为优秀。发酵24 h后，17株菌株对亚硝酸盐的降解率都比较高，均>90%，分别为植物乳植杆菌、短乳杆菌和食窦魏斯氏菌、发酵乳杆菌。优于黄慧福等[21]从云南省富源县发酵酸菜中分离筛选出来的乳酸菌菌株（85.91%）。发酵24 h后，菌株D8、X5、D7、X4、D6降解率在95%以上，其中D8菌株降解率最高，为（98.42±0.45）%，显著高于其他菌株（P<0.05），该降解率也高于郑琦锴等[22]从湖南洞口地区泡菜液中分离筛选出来的乳酸菌菌株（94.98%）。乳酸菌可通过多种机制降低亚硝酸盐质量浓度，如代谢产酸抑制肠杆菌增殖，以促进亚硝酸盐还原，以及竞争性消耗氮源，以阻断亚硝酸盐合成途径等[23-24]。

表1　不同乳酸菌菌株亚硝酸盐降解率及鉴定结果

Table 1　Nitrite degradation rates by different LAB strains and their identification results

菌株编号	发酵12 h的降解率/%	发酵24 h的降解率/%	鉴定结果	同源性
D8	91.23±0.31^{a}	98.42±0.45^{a}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X5	91.39±0.74^{a}	97.30±0.23^{b}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
D7	90.42±0.36^{bc}	96.70±0.59^{b}	*Lactiplantibacillus plantarum*	98%
X4	90.97±0.55^{ab}	96.53±0.67^{b}	*Levilactobacillus brevis*	99%
D6	90.07±0.52^{c}	95.23±0.78^{c}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
D3	89.03±0.50^{d}	94.81±0.41^{cd}	*Lactiplantibacillus plantarum*	97%
X2	87.65±0.59^{e}	94.71±0.69^{cd}	*Lactiplantibacillus plantarum*	97%
D4	89.87±0.34^{c}	94.33±0.63^{cde}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
D5	88.85±0.37^{d}	94.04±0.78^{de}	*Lactiplantibacillus plantarum*	98%
D2	85.58±0.76^{f}	93.85±0.48^{de}	*Weissella cibaria*	99%
D1	68.73±0.59^{h}	93.34±0.47^{ef}	*Limosilactobacillus fermentum*	99%
D9	85.31±0.50^{f}	92.64±0.65^{fg}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X3	82.91±0.20^{g}	92.41±0.57^{fgh}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X8	87.53±0.65^{e}	91.61±0.27^{ghi}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X6	83.66±0.56^{g}	91.38±0.41^{hi}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X7	87.37±0.59^{e}	90.91±0.57^{i}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
D10	89.64±0.71^{cd}	90.49±0.63^{i}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X1	48.67±0.61^{i}	88.45±1.24^{j}	*Lactiplantibacillus plantarum*	100%
X10	85.78±0.82^{f}	87.26±0.84^{k}	*Lactiplantibacillus pentosus*	99%
X9	27.07±0.06^{j}	85.74±0.65^{l}	*Levilactobacillus brevis*	99%

注：本表以发酵24 h的降解率从高到低进行排序；同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2　乳酸菌产酸速度和产酸量结果

在乳酸菌的发酵过程中，随着发酵时间不断延长，一个显著的变化趋势是各乳酸菌发酵液中的pH持续下降，产酸量显著升高。如表2所示，发酵24 h后，发酵液的pH普遍下降至3.8以下，产酸量则大多上升至19 g/L以上。值得注意的是，不同菌株在生长过程中，其产酸性能表现出显著差异。在发酵24 h后，9株菌株的产酸量均

成功达到20 g/L以上。在这些菌株中，菌株D8、X2、X5、X4展现出尤为突出的产酸能力，在发酵24 h后，产酸量均大于21 g/L；而菌株D8在发酵24 h后，pH下降至3.63±0.05，产酸量高达（22.65±0.05）g/L。在酸菜发酵过程中，应用产酸快且产乳酸能力强的菌株，可快速降低环境pH，有效抑制杂菌生长、缩短发酵周期、提高发酵效率，并提升产品风味。同时，快速建立的酸性环境有助于抑制亚硝酸盐生成并促进其降解，从而显著提高发酵过程的安全性和可控性，更有利于工业化生产的稳定性与效率。通过亚硝酸盐降解率和产酸量进行评估，菌株D8的这2个指标均最高，说明其具备高效的酸化能力和亚硝酸盐降解能力，可将其作为乳酸菌发酵菌剂的来源。此外，亚硝酸盐降解率较高的菌株，其产酸量均在20 g/L以上。乳酸菌能够厌氧代谢碳水化合物生成乳酸等有机酸[25]，这一特性与其抑菌活性和亚硝酸盐降解能力密切相关[26]。乳酸菌在降解亚硝酸盐的过程中主要采用2种途径，即酶降解和酸降解[27]。本研究中，菌株X1、D5发酵24 h的产酸量分别低至（6.45±0.52）、（7.05±0.05）g/L，但其亚硝酸盐降解率仍然达到88%以上，说明这2个菌株降解亚硝酸盐的方式以酶降解为主，可能是这些菌株产生的亚硝酸盐还原酶等代谢物能够高效降解亚硝酸盐，而其余产酸量高的菌株则以酸降解为主。

表2　不同乳酸菌在发酵过程中的pH和产酸能力变化

Table 2　Changes in pH and acid production capacity of various LAB strains during fermentation

菌株编号	发酵12 h的pH	发酵24 h的pH	发酵12 h的产酸量/（g/L）	发酵24 h的产酸量/（g/L）
D8	3.69±0.13^{j}	3.63±0.05^{hi}	15.73±0.22^{b}	22.65±0.05^{a}
X2	4.04±0.14^{def}	3.68±0.04^{ghi}	13.91±0.24^{e}	21.75±0.05^{ab}
X5	3.91±0.12^{efj}	3.66±0.02^{ghi}	14.83±0.23^{c}	21.75±0.05^{ab}
X4	3.90±0.23^{efj}	3.69±0.02^{ghi}	16.64±0.12^{a}	21.45±0.05^{ab}
X6	4.03±0.10^{def}	3.62±0.02^{i}	13.03±0.12^{f}	20.85±0.52^{bc}
D7	3.93±0.23^{efj}	3.64±0.03^{ghi}	13.93±0.12^{de}	20.85±0.05^{bc}
D10	4.16±0.08^{def}	3.67±0.02^{ghi}	12.13±0.08^{g}	20.55±1.37^{bcd}
D3	3.87±0.16^{fj}	3.69±0.01^{ghi}	15.73±0.22^{b}	20.55±0.05^{bcd}
D6	4.02±0.13^{defj}	3.66±0.05^{ghi}	14.83±0.12^{c}	20.55±0.05^{bcd}
X3	4.04±0.11^{def}	3.77±0.04^{ef}	13.93±0.13^{de}	19.95±0.52^{cde}
X10	4.03±0.05^{def}	3.63±0.02^{hi}	13.04±0.07^{f}	19.65±1.04^{cde}
D4	3.90±0.07^{fj}	3.70±0.02^{gh}	14.82±0.13^{c}	19.65±0.05^{cde}
D9	4.24±0.16^{de}	3.71±0.04^{fg}	9.44±0.11^{i}	19.35±0.90^{de}
X9	4.62±0.16^{c}	3.78±0.03^{ef}	10.32±0.54^{h}	19.05±0.52^{ef}
X8	4.05±0.12^{def}	3.71±0.03^{fg}	14.82±0.23^{c}	18.75±0.52^{ef}
X7	4.35±0.04^{cd}	3.82±0.03^{e}	12.13±0.09^{g}	17.85±0.52^{f}
D1	4.61±0.13^{c}	4.04±0.06^{d}	9.43±0.22^{i}	15.15±0.52^{g}
D2	4.09±0.22^{def}	4.15±0.08^{c}	13.94±0.11^{d}	13.65±1.37^{h}
D5	5.54±0.14^{b}	5.44±0.07^{b}	5.83±0.22^{j}	7.05±0.05^{i}
X1	5.81±0.06^{a}	5.85±0.01^{a}	5.83±0.05^{j}	6.45±0.52^{i}

注：本表以发酵24 h的产酸量从高到低进行排序；同列不同小写表示差异显著（P<0.05）。

2.3　乳酸菌耐酸生长测定结果

酸菜在发酵过程中会产酸，因此，发酵用菌株需要有一定的酸耐受能力。由表3可知，随着pH的升高，各菌液的OD_{600}值均有不同程度的升高，乳酸菌的生长呈上升趋势。不同类型的发酵菌株对酸性环境的耐受性有差异，当pH为2时，菌株的OD_{600}值最小。许强等[28]研究发现，在pH为2的条件下，菌株的生长抑制效果最为明显，与本研究的结果相符合。酸菜在发酵过程中，pH普遍下降至3左右，故以pH为3时考察菌株的酸耐受力。pH由2上升至3时，OD_{600}值变化较小，说明在强酸环境下，菌株生长缓慢，其中菌株D3、X8、D9、D4的

OD_{600}值显著高于其他菌株，说明这4种菌株的酸耐受能力强。当pH由3上升为4时，OD_{600}值变化较大，且当pH为4时，大部分菌株OD_{600}值>2，说明菌株在这个pH区间内生长能力好。而当pH为5时，大部分菌株OD_{600}值达到2.5以上，表明此时的pH环境适宜菌株生长。当pH为5~6时，OD_{600}值的变化相对平稳，对菌株生长的影响并不显著，说明这个pH范围已接近菌株生长的适宜环境。

表3　不同pH下各乳酸菌的OD_{600}值

Table 3　OD_{600} values of LAB strains cultured under different pH conditions

菌株编号	OD_{600}值				
	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5	pH 6
D3	0.244±0.002^{bc}	0.344±0.012^{a}	2.281±0.002^{g}	2.777±0.009^{a}	2.709±0.009^{j}
X8	0.331±0.004^{a}	0.343±0.013^{a}	2.282±0.102^{g}	2.677±0.035^{f}	2.780±0.082^{d}
D9	0.190±0.001^{bcd}	0.331±0.002^{b}	2.479±0.115^{b}	2.746±0.062^{b}	2.755±0.094^{ef}
D4	0.209±0.007^{bcd}	0.323±0.013^{b}	2.497±0.015^{a}	2.574±0.013^{i}	2.602±0.010^{l}
D8	0.202±0.007^{bcd}	0.268±0.038^{c}	2.444±0.013^{c}	2.707±0.010^{d}	2.868±0.006^{a}
X9	0.261±0.001^{ab}	0.262±0.004^{c}	2.217±0.012^{i}	2.775±0.121^{a}	2.846±0.094^{c}
X1	0.180±0.001^{cd}	0.247±0.011^{d}	2.340±0.023^{e}	2.742±0.091^{b}	2.771±0.108^{cd}
D7	0.197±0.010^{bcd}	0.240±0.012^{de}	2.478±0.009^{b}	2.600±0.006^{h}	2.769±0.009^{d}
X5	0.188±0.006^{cd}	0.232±0.024^{e}	2.230±0.033^{h}	2.625±0.015^{g}	2.763±0.007^{de}
X6	0.195±0.009^{bcd}	0.213±0.010^{f}	2.117±0.051^{j}	2.602±0.061^{h}	2.745±0.081^{f}
X4	0.178±0.005^{cd}	0.212±0.015^{fj}	2.356±0.016^{d}	2.699±0.005^{e}	2.823±0.020^{c}
X2	0.157±0.051^{d}	0.203±0.023^{fgh}	1.705±0.008^{m}	2.181±0.012^{j}	2.528±0.005^{m}
X10	0.173±0.003^{cd}	0.202±0.008^{gh}	2.215±0.025^{i}	2.728±0.101^{c}	2.853±0.103^{b}
D10	0.055±0.008^{e}	0.200±0.005^{h}	2.308±0.022^{f}	2.629±0.075^{g}	2.704±0.106^{i}
X3	0.167±0.011^{d}	0.177±0.004^{i}	1.801±0.117^{k}	2.732±0.041^{c}	2.719±0.073^{g}
D5	0.133±0.001^{d}	0.175±0.004^{i}	0.204±0.010^{o}	0.479±0.012^{m}	0.705±0.005^{p}
D1	0.159±0.050^{d}	0.169±0.011^{ij}	1.741±0.021^{l}	1.820±0.041^{k}	2.181±0.131^{n}
D6	0.055±0.081^{e}	0.167±0.011^{j}	2.208±0.011^{i}	2.585±0.006^{i}	2.658±0.007^{k}
D2	0.159±0.002^{d}	0.166±0.021^{j}	1.227±0.012^{n}	1.536±0.062^{l}	1.868±0.084^{o}
X7	0.137±0.002^{d}	0.135±0.009^{k}	2.442±0.105^{c}	2.655±0.102^{i}	2.686±0.093^{j}

注：本表以pH为3时菌株的OD_{600}值从高到低进行排序；同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.4　乳酸菌耐盐生长测定结果

盐水平提高可以增加发酵液的渗透压，抑制腐败菌的生长，因此，发酵菌株对盐的耐受性非常重要[29-30]。食盐的添加量是影响酸菜发酵的重要因素之一，不仅能调控微生物的生长种类和活性，还直接决定了成品的风味和品质。由表4可知，测试的20株乳酸菌对NaCl耐受性存在差异，菌株的生长与NaCl质量分数呈负相关。在质量分数2%的NaCl条件下，各菌株OD_{600}值均达到峰值；当质量分数上升至10%时，其生长受到明显抑制，大部分菌株OD_{600}值降至最低。周艺萍等[31]研究了盐质量分数对新平酸腌菜发酵过程的影响，发现盐质量分数为10%时的微生物生长情况较差，且腌菜的口感也差，与本研究结果一致。因此，筛选在NaCl质量分数为6%~8%时生长能力好的菌株作为优势发酵菌株。从表中可看出，菌株X1、X8、X3、D8、X10在质量分数为6%、8%的NaCl溶液中OD_{600}值分别达到2.5及2.0以上，说明其对盐的耐受力较好，具备成为优质乳酸菌菌种的潜力。

2.5　乳酸菌抑菌性能测定结果

供试乳酸菌对大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门菌的抑菌试验结果见表5。由表5可知，20株乳酸菌对3种常见致病菌均有不同程度的抑制能力。所有菌株对大肠埃希氏菌的抑菌圈直径为（10.11±0.32）~（19.14±0.61）mm，对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径为（10.87±0.31）~（20.89±0.37）mm，对鼠伤寒沙门菌的抑菌圈直径为（10.07±0.32）~（17.74±0.19）mm，说明乳酸菌对这3种常见的致病菌均有较强的抑制作用。其中菌株X5、X4、D8、D7对这3种菌的抑菌圈直径均>15

表 4 不同质量分数 NaCl 下各乳酸菌的 OD_{600} 值

Table 4 OD_{600} values of LAB strains cultured with NaCl at different mass fractions

菌株编号	OD_{600} 值				
	质量分数 2% 的 NaCl	质量分数 4% 的 NaCl	质量分数 6% 的 NaCl	质量分数 8% 的 NaCl	质量分数 10% 的 NaCl
X1	2.817±0.010^{b}	2.744±0.010^{a}	2.538±0.015^{a}	2.145±0.015^{c}	0.850±0.020^{d}
X8	2.811±0.015^{bc}	2.688±0.026^{b}	2.529±0.021^{a}	2.252±0.010^{b}	0.839±0.013^{d}
X3	2.884±0.008^{a}	2.706±0.012^{ab}	2.520±0.009^{ab}	2.172±0.021^{c}	0.590±0.012^{f}
D8	2.750±0.015^{e}	2.639±0.025^{c}	2.501±0.015^{ab}	2.002±0.012^{d}	0.375±0.011^{h}
X10	2.821±0.012^{b}	2.722±0.011^{ab}	2.501±0.010^{ab}	2.157±0.025^{c}	0.935±0.021^{c}
X9	2.729±0.031^{f}	2.621±0.077^{cd}	2.420±0.073^{c}	1.026±0.026^{j}	0.254±0.022^{i}
X6	2.735±0.010^{ef}	2.588±0.008^{de}	2.401±0.007^{c}	2.267±0.015^{b}	0.734±0.210^{e}
X7	2.767±0.010^{d}	2.544±0.078^{fj}	2.299±0.111^{d}	1.805±0.016^{f}	0.247±0.010^{i}
D7	2.612±0.010^{h}	2.512±0.010^{g}	2.242±0.012^{e}	1.716±0.015^{g}	0.254±0.010^{i}
X4	2.709±0.013^{g}	2.639±0.026^{c}	2.222±0.025^{e}	1.994±0.011^{d}	1.224±0.026^{b}
D3	2.536±0.010^{j}	2.519±0.009^{fj}	2.088±0.028^{f}	1.668±0.015^{h}	0.366±0.016^{h}
X5	2.364±0.017^{l}	2.178±0.023^{i}	2.086±0.018^{f}	1.996±0.012^{d}	0.377±0.021^{h}
D4	2.769±0.022^{d}	2.549±0.015^{efg}	1.888±0.009^{g}	1.568±0.012^{i}	0.588±0.006^{f}
D1	2.005±0.006^{n}	1.947±0.031^{i}	1.498±0.005^{h}	0.548±0.007^{n}	0.164±0.006^{k}
D6	2.555±0.016^{i}	2.257±0.005^{h}	1.487±0.007^{h}	0.636±0.026^{m}	0.376±0.006^{h}
D10	2.797±0.004^{d}	2.555±0.015^{ef}	1.390±0.013^{i}	0.855±0.011^{k}	0.210±0.110^{j}
D2	2.060±0.021^{m}	1.623±0.002^{l}	1.367±0.017^{i}	0.258±0.030^{o}	0.152±0.019^{k}
D9	2.508±0.009^{k}	1.830±0.009^{k}	0.849±0.007^{j}	0.715±0.013^{l}	0.085±0.003^{m}
X2	2.624±0.010^{h}	1.835±0.005^{l}	0.642±0.003^{k}	0.581±0.051^{n}	0.564±0.003^{g}

注：本表以 NaCl 质量分数为 6% 时菌株的 OD_{600} 值从高到低进行排序；同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

mm，抑菌效果明显，说明它们能够在发酵过程中有效抑制病原菌的生长。本研究也发现，抑菌效果较强的菌株，其产酸量相对较高，但并非所有产酸量高的菌株抑菌作用都强，这可能与其产生的除了酸以外的其他抑菌活性物质有关。乳酸菌通过糖酵解代谢产生乳酸、乙酸等有机酸，有机酸可与细胞膜中的磷脂和脂多糖作用，破坏目标菌株的细胞膜结构。此外，乳酸菌产生的细菌素、H_2O_2 均有显著的抑菌能力，并且可以通过不同抑菌途径对细菌的生物膜进行清除[32]，细菌素可通过破坏细胞膜完整性及干扰 DNA 生物合成发挥抑菌作用。

2.6 乳酸菌耐药性结果

近年来，因为抗生素的过量应用，导致很多种类的乳酸菌出现了耐药性，耐药性基因可能通过食物链进入人体肠道并在肠道内累积，对人体健康产生潜在威胁[33]。因此，对乳酸菌菌株进行药物敏感性试验以了解其药敏谱是必要的。本研究选取了常见的五大类 20 种抗生素，对菌株进行耐药性评价，结果见表 6。从青霉素类来看，所有菌株均对哌拉西林、氨苄西林敏感，20% 的菌株对苯

表 5 乳酸菌对致病菌的抑菌圈直径

Table 5 Inhibition zone diameters of LAB strains against pathogenic bacteria

菌株编号	抑菌圈直径/mm		
	大肠埃希氏菌	金黄色葡萄球菌	鼠伤寒沙门菌
X5	19.14±0.61^{a}	20.89±0.37^{a}	17.15±0.60^{ab}
X4	18.67±0.21^{a}	19.26±0.26^{b}	17.74±0.19^{a}
D8	18.40±0.08^{ab}	19.36±0.24^{b}	16.52±0.57^{b}
D7	16.28±0.40^{c}	17.75±0.30^{c}	15.54±0.39^{c}
D5	14.71±0.39^{d}	16.96±0.45^{d}	15.61±0.19^{c}
X9	14.66±0.27^{d}	16.33±0.62^{d}	14.45±0.12^{d}
X1	13.15±0.23^{e}	13.78±0.43^{efg}	14.34±0.47^{d}
D3	12.93±0.35^{ef}	13.10±0.34^{ghi}	12.65±0.47^{fg}
D10	12.91±0.63^{ef}	14.38±0.30^{e}	13.51±0.47^{e}
X8	12.89±0.31^{ef}	12.59±0.44^{i}	14.26±0.39^{d}
X10	12.59±0.26^{efg}	13.03±0.35^{ghi}	14.51±0.96^{d}
X6	12.42±0.32^{dfg}	14.52±0.57^{e}	14.53±0.36^{df}
X2	12.40±0.16^{fg}	12.89±0.40^{hi}	11.96±0.35^{g}
D4	12.14±0.29^{gh}	13.07±0.19^{ghi}	14.93±0.34^{cd}
D6	12.14±0.29^{gh}	13.07±0.19^{ghi}	14.93±0.34^{cd}
D9	11.72±0.71^{hi}	13.91±0.35^{ef}	14.35±0.22^{d}
X3	11.69±0.44^{hi}	13.31±0.55^{fghi}	10.08±0.57^{i}
X7	11.25±0.13^{i}	13.61±0.45^{fgh}	12.73±0.04^{f}
D1	10.23±0.29^{j}	10.88±0.76^{k}	10.07±0.32^{i}
D2	10.11±0.32^{j}	10.87±0.31^{j}	11.19±0.41^{h}

注：本表以乳酸菌对大肠埃希氏菌的抑菌圈直径从大到小进行排序；同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

唑西林、青霉素耐药。从头孢类来看，所有菌株均对头孢唑啉敏感，仅有5%的菌株对头孢呋辛和头孢哌酮耐药，15%的菌株对头孢他啶和头孢氨苄耐药，20%的菌株对头孢拉定耐药。总体看来，大部分菌株对头孢类、青霉素类药物敏感。从氨基糖苷类来看，所有菌株对卡那霉素、庆大霉素和新霉素耐药，仅有5%的菌株对丁胺卡那、链霉素敏感，其余均耐药。研究结果显示，多数乳酸菌对糖肽类抗生素（如万古霉素）及氨基糖苷类抗生素（如庆大霉素、卡那霉素和链霉素）表现出固有耐药性[34-35]。这可能是乳酸菌对糖肽类抗生素和氨基糖苷类抗生素具有天然耐受能力[36]。从大环内酯类来看，仅有5%的菌株对红霉素、米诺环素耐药。从四环素类来看，所有菌株对多西环素敏感，20%的菌株对四环素耐药。Nawaz等[37]在发酵食物中提取乳酸菌并对其耐药程度进行研究，发现了耐四环素的基因*tet*(*S*)、*tet*(*M*)和耐红霉素的基因*erm*(*B*)。目前，许多获批的益生菌膳食补充剂中均含有耐药基因[38]，说明人们更重视益生菌的益生效果，而对耐药基因转移的担忧相对较少。

2.7　乳酸菌溶血性测试结果

溶血现象是由细菌溶血素介导的红细胞溶解反应，该毒素作为关键致病因子，在细菌性感染中发挥重要作用，同时也是评估乳酸菌安全性的必要检测指标[39]。溶血性结果显示，20株菌株在血平板上的菌落周围无任何变化，没有溶血环，说明红细胞未被破坏，为γ溶血，见图2(a)。阳性对照组的金黄色葡萄球菌呈现明显的β溶血环，见图2(b)，说明红细胞已完全溶解。结果表明，乳酸菌属是安全的共生菌，缺乏溶血素，不会产生机会性毒力，符合食品安全的要求[40]。

2.8　乳酸菌氨基酸脱羧酶活性试验结果

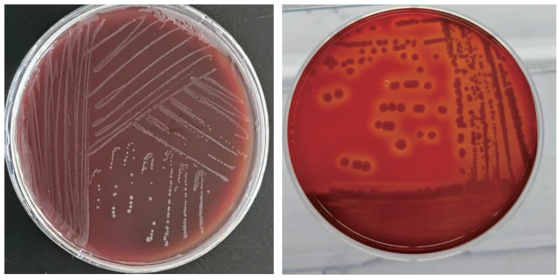
发酵过程中微生物代谢可产生多种有害产物，尤其以生物胺的危害最显著。生物胺主要是

表6　菌株对抗生素的耐药性

Table 6　Antibiotic susceptibility of the strains

菌株编号	青霉素类				头孢类							氨基糖苷类					大环内酯类		四环素类	
	哌拉西林	氨苄西林	苯唑西林	青霉素	头孢他啶	头孢呋辛	头孢拉定	头孢唑啉	头孢氨苄	头孢曲松	头孢哌酮	卡那霉素	庆大霉素	丁胺卡那	链霉素	新霉素	红霉素	米诺环素	多西环素	四环素
D1	S	S	R	S	S	S	S	S	S	S	I	R	R	R	R	R	S	S	S	I
D2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	R	S	R	R	R	R	R	S	S	S	S
D3	S	S	I	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	S	S	S	I
D4	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	I	S	S	S
D5	S	S	S	R	I	S	S	S	S	S	S	R	R	S	R	R	R	S	S	I
D6	S	S	S	R	R	I	I	S	I	I	S	R	R	R	R	R	I	S	S	S
D7	S	S	I	S	S	I	I	S	S	S	I	R	R	R	R	R	S	S	S	R
D8	S	S	I	S	R	S	R	S	S	S	R	R	R	R	R	R	I	I	S	S
D9	S	S	I	R	S	S	I	S	I	S	S	R	R	R	S	R	S	R	S	S
D10	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	S	S	S	R
X1	S	S	S	S	S	S	S	S	I	I	S	R	R	R	R	R	S	S	S	S
X2	S	S	R	S	S	S	S	S	I	S	S	R	R	R	R	R	S	S	S	S
X3	S	S	R	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	S	S	S	S
X4	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	S	S	S	S
X5	S	S	I	S	S	S	S	S	S	I	I	R	R	R	R	R	S	S	S	S
X6	S	S	I	S	S	I	S	S	I	I	I	R	R	R	R	R	I	S	S	I
X7	S	S	S	S	S	R	R	S	R	R	S	R	R	R	R	R	I	S	S	R
X8	S	S	R	S	I	S	R	S	R	S	S	R	R	R	R	R	I	S	S	S
X9	S	S	S	R	R	I	R	S	R	I	I	R	R	R	R	R	S	S	S	S
X10	S	S	I	S	S	I	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	S	S	S	R
耐药率/%	0	0	20	20	15	5	20	0	15	10	5	100	100	95	95	100	5	5	0	20

注：按照微生物药物敏感性试验执行标准判断，S、I、R分别表示对药物敏感、中介、耐药。



(a) 乳酸菌γ溶血现象 (b) 金黄色葡萄球菌β溶血现象

图 2 乳酸菌溶血性测试结果

Fig. 2 Images of hemolysis test for LAB strains

由氨基酸在氨基酸脱羧酶作用下形成的具有生物活性的含氮有机化合物[41]。因此，对乳酸菌菌株进行氨基酸脱羧酶活性试验是必要的，本研究选取的精氨酸、赖氨酸、鸟氨酸是产生常见且危害较大的腐胺、尸胺的前体物质。结果表明，所有菌株的3种氨基酸脱羧酶的测试结果均为阴性，表明均不存在产生生物胺的潜在风险。

3 结论

本文从40份酸菜样品中共分离出208株乳酸菌，以亚硝酸盐降解率和产酸能力为首要评估指标，综合考虑其抑菌能力、酸耐受能力、盐耐受能力及安全性。筛选出优质发酵菌株D8，其亚硝酸盐降解率为(98.42±0.45)%，发酵24 h后，pH下降至3.63±0.05，产酸量高达(22.65±0.05) g/L；在质量分数为8%的NaCl溶液中，其OD_{600}值达到2.002±0.012；在pH 3的溶液中，其OD_{600}值为0.268±0.038，表现出了良好的耐酸、耐盐生长特性。另外，其对大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门菌的抑菌圈直径分别为(18.40±0.08)、(19.36±0.24)、(16.52±0.57) mm，抑菌效果优越。菌株无溶血性，精氨酸、赖氨酸、鸟氨酸脱羧酶活性试验结果均为阴性，且对大部分抗生素敏感。本研究为将菌株D8作为潜在发酵剂应用于酸菜的高品质工业化生产提供了优良种质资源，对构建安全稳定的乳酸发酵食品体系及保障食品安全提供了理论支持。然而，本研究尚未将菌株D8置于实际发酵环境中验证其应用效果，后续需进一步开展相关研究，监测产品质量指标，解析发酵过程中菌群变化规律，为菌株D8的产业化应用提供更坚实的理论支撑。

参考文献

[1] 聂紫玉，吴艳阳，王增光，等. 植物源益生乳酸菌的筛选及其特性[J]. 食品科学，2022，43(18)：143-151.
NIE Z Y，WU Y Y，WANG Z G，et al. Screening and characterization of plant-derived probiotic lactic acid bacteria[J]. Food Science，2022，43(18)：143-151.(in Chinese)

[2] CHEN A J，LUO W，NIU K L，et al. Research on the relationship between sensory profile and physicochemical properties of Paocai，a Chinese fermented vegetable[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2019，43(12)：14237.

[3] LEE M，SONG J H，LEE S H，et al. Effect of seasonal production on bacterial communities in Korean industrial kimchi fermentation[J]. Food Control，2018，91：381-389.

[4] 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)：1257-1265.

[5] 施渺筱，洪蕴，汤鑫鑫，等. 自然发酵泡菜中乳酸菌的分离鉴定及其在金刺梨汁发酵中的应用[J]. 中国酿造，2022，41(1)：109-115.
SHI M X，HONG W /Y)，TANG X X，et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria in natural fermentation Paocai and its application in the fermentation of *Rosa sterilis* juice[J]. China Brewing，2022，41(1)：109-115.(in Chinese)

[6] SON S H，JEON H L，JEON E B，et al. Potential probiotic *Lactobacillus plantarum* Ln4 from kimchi：evaluation of *β*-galactosidase and antioxidant activities[J]. LWT-Food Science and Technology，2017，85：181-186.

[7] HUANG Y Y，JIA X Z，YU J J，et al. Effect of different lactic acid bacteria on nitrite degradation，volatile profiles，and sensory quality in Chinese traditional Paocai[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，147：111597.

[8] LIU W L，LI H M，LIU L，et al. Screening of gamma-aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria and the characteristic of glutamate decarboxylase from *Levilactobacillus brevis* F109-MD3 isolated from kimchi[J]. Journal of Applied Microbiology，2022，132(3)：1967-1977.

[9] LEE J，JIN Y H，PAWLUK A M，et al. Reduction in biogenic amine content in *Baechu*（Napa cabbage）kimchi by biogenic amine-degrading lactic acid bacteria[J]. Microorganisms，2021，9(12)：2570.

[10] 关倩倩，熊涛，谢明勇. 植物基食品乳酸菌发酵技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(7)：1-11.
GUAN Q Q，XIONG T，XIE M Y. Research progress in lactic acid bacteria fermentation technology of plant-based

foods[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022,41(7):1-11.(in Chinese)

[11] 燕平梅,王炫月,赵文婧. 泡菜中亚硝酸盐形成、还原相关微生物的研究[J]. 中国调味品,2020,45(9):77-80,94.
YAN P M, WANG X Y, ZHAO W J. Study on microorganisms related to nitrite formation and reduction in pickles[J]. China Condiment,2020,45(9):77-80,94.(in Chinese)

[12] YANG X Z, HU W Z, XIU Z L, et al. Comparison of northeast sauerkraut fermentation between single lactic acid bacteria strains and traditional fermentation[J]. Food Research International,2020,137:109553.

[13] 陈晟,罗佳瑶,蒋立文,等. 我国腌渍蔬菜产业现状分析及改进对策[J]. 中国酿造,2018,37(7):6-10.
CHEN S, LUO J Y, JIANG L W, et al. Status analysis and improving measures of pickled vegetables industry in China [J]. China Brewing, 2018, 37(7):6-10. (in Chinese)

[14] 刘振恒,阴耕云,肖冬,等. 泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及发酵工艺优化[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(9):125-132,172.
LIU Z H, YIN G Y, XIAO D, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria from pickles and optimization of fermentation process[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(9): 125-132, 172.(in Chinese)

[15] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定:GB 5009.33—2025[S]. 北京:中国标准出版社,2026.

[16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定:GB 12456—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[17] MOTEY G A, OWUSU-KWARTENG J, OBIRI-DANSO K, et al. *In vitro* properties of potential probiotic lactic acid bacteria originating from Ghanaian indigenous fermented milk products [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2021,37(3):52.

[18] 杜晓华,刘书亮,蒲彪,等. 四川泡菜中降解亚硝酸盐乳酸菌的筛选鉴定及其应用[J]. 食品与发酵工业,2013,39(4):48-52.
DU X H, LIU S L, PU B, et al. Screening, identification and application of nitrite-degenerating lactic acid bacteria from Sichuan pickles [J]. Food and Fermentation Industries,2013,39(4):48-52.(in Chinese)

[19] 龚福明,何彩梅,吴桂容,等. 乳酸菌降解发酵蔬菜中亚硝酸盐的研究现状[J]. 中国调味品,2022,47(10):201-205.
GONG F M, HE C M, WU G R, et al. Research status of nitrite degradation in fermented vegetables by lactic acid bacteria[J]. China Condiment, 2022, 47(10): 201-205.(in Chinese)

[20] 迟雪梅,王一茜,乔慧,等. 发酵蔬菜硝酸盐、亚硝酸盐消长变化及其相关性的研究[J]. 食品与发酵工业,2018,44(1):25-30.
CHI X M, WANG Y Q, QIAO H, et al. Study on the change of nitrate and nitrite in fermented vegetable and its correlation[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1):25-30.(in Chinese)

[21] 黄慧福,宁丹,杨诚睿. 传统富源酸菜中优质乳酸菌的筛选及应用[J]. 食品研究与开发,2023,44(4):197-202.
HUANG H F, NING D, YANG C R. Screening and application of high-quality *Lactobacillus* in Fuyuan traditional pickle[J]. Food Research and Development, 2023,44(4):197-202.(in Chinese)

[22] 郑琦锴,蔡常宇,王临好,等. 传统泡菜中高产酸乳酸菌的筛选与鉴定[J]. 现代食品科技,2023,39(9):96-105.
ZHENG Q K, CAI C Y, WANG L H, et al. Screening and identification of high acid-producing lactic acid bacteria in traditional kimchi[J]. Modern Food Science & Technology,2023,39(9):96-105.(in Chinese)

[23] 李婧,张敏,胡凯弟,等. 泡菜中亚硝酸盐生物减除研究进展[J]. 食品与发酵工业,2025, 51(9):369-376.
LI J, ZHANG M, HU K D, et al. Research progress on nitrite biological reduction in Paocai [J]. Food and Fermentation Industries,2025,51(9):369-376.(in Chinese)

[24] WANG Z X, SHAO Y Y. Effects of microbial diversity on nitrite concentration in Paocai, a naturally fermented cabbage product from China[J]. Food Microbiology, 2018,72:185-192.

[25] 敖晓琳,张小平,史令,等. 四川泡菜中两株优良乳酸菌的鉴定及不同发酵条件对其发酵泡菜品质的影响[J]. 食品科学,2011,32(11):152-156.
AO X L, ZHANG X P, SHI L, et al. Identification of two lactic acid bacterial strains isolated from Sichuan pickles and effect of fermentation conditions on the quality of pickles co-fermented by them[J]. Food Science, 2011, 32(11):152-156.(in Chinese)

[26] 柳念,陈佩,高冰,等. 乳酸菌降解亚硝酸盐的研究进展[J]. 食品科学,2017,38(7):290-295.
LIU N, CHEN P, GAO B, et al. Progress in understanding degradation of nitrite by lactic acid bacteria [J]. Food Science,2017,38(7):290-295.(in Chinese)

[27] 皮佳婷,刘冬敏,王建辉,等. 乳酸菌降解泡菜中亚硝酸盐的机制及应用研究现状[J]. 食品与发酵工业,2021,

47(24):301-307.
PI J T,LIU D M,WANG J H,et al. Advances on nitrite degradation mechanisms of lactic acid bacteria in pickles[J]. Food and Fermentation Industries,2021,47(24):301-307.(in Chinese)

[28] 许强,袁乐梅,唐雪梅,等. 川西彝族酸菜汁中抗氧化乳酸菌筛选及益生特性研究[J]. 中国调味品,2021,46(8):60-64.
XU Q,YUAN L M,TANG X M,et al. Screening of *Lactobacillus* from traditional Yi pickle juice in Western Sichuan with antioxidant and probiotic characteristics[J]. China Condiment,2021,46(8):60-64.(in Chinese)

[29] 毛丙永,殷瑞敏,赵楠,等. 四川老卤泡菜基本理化指标及特征菌群分离鉴定[J]. 食品与发酵工业,2018,44(11):22-27.
MAO B Y,YIN R M,ZHAO N,et al. The physical and chemical properties of Sichuan old brined Paocai and the isolation of characteristic microbes[J]. Food and Fermentation Industries,2018,44(11):22-27.(in Chinese)

[30] 柳青,史迪,刘文俊,等. 摩洛哥自然发酵驼乳中乳酸菌分离鉴定及特性研究[J]. 食品科学技术学报,2022,40(4):85-95,137.
LIU Q,SHI D,LIU W J,et al. Isolation,identification and characterization of lactic acid bacteria in naturally fermented camel milk from Morocco[J]. Journal of Food Science and Technology,2022,40(4):85-95,137.(in Chinese)

[31] 周艺萍,熊智,李选文,等. 不同盐浓度对新平酸腌菜发酵过程的影响[J]. 中国调味品,2021,46(5):13-17.
ZHOU Y P,XIONG Z,LI X W,et al. Effects of different salt concentration on the fermentation of Xinping pickled mustard[J]. China Condiment,2021,46(5):13-17.(in Chinese)

[32] 杨慧轩,罗欣,梁荣蓉,等. 乳酸菌作为生物抑菌剂在肉与肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学,2022,43(7):317-325.
YANG H X,LUO X,LIANG R R,et al. Application of lactic acid bacteria as biological antibacterial agent in meat and meat products:a review[J]. Food Science,2022,43(7):317-325.(in Chinese)

[33] 于涛,姜晓冰,李磊,等. 市售酸奶中乳酸菌耐药性及耐药基因的检测[J]. 食品科学,2016,37(11):131-136.
YU T,JIANG X B,LI L,et al. Antimicrobial resistance and resistance genes in lactic acid bacteria isolated from commercial yogurt[J]. Food Science,2016,37(11):131-136.(in Chinese)

[34] 杨博,柏吉,靳亚梅,等. 新疆地区驴乳源优良乳酸菌发酵剂的筛选及菌株益生特性[J]. 食品科学,2022,43(2):224-232.
YANG B,BAI J,JIN Y M,et al. Screening of lactic acid bacteria from donkey milk in Xinjiang for use as starter culture and their probiotic characteristics[J]. Food Science,2022,43(2):224-232.(in Chinese)

[35] 顾晨荣,俞漪,张娜娜,等. 荧光定量PCR方法检测杀菌型乳酸菌产品中的耐药基因[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(17):5927-5932.
GU C R,YU Y,ZHANG N N,et al. Detection of drug resistance genes in sterilization *Lactobacillus* products by fluorescence quantitative PCR[J]. Journal of Food Safety & Quality,2020,11(17):5927-5932.(in Chinese)

[36] 杜秋,周晓,覃业优,等. 发酵蔬菜源食品用益生乳酸菌的筛选及降胆固醇能力评价[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(11):63-73.
DU Q,ZHOU X,QIN Y Y,et al. Screening and evaluating with cholesterol-lowering ability of probiotic lactic acid bacteria for food from fermented vegetable[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(11):63-73.(in Chinese)

[37] NAWAZ M,WANG J,ZHOU A P,et al. Characterization and transfer of antibiotic resistance in lactic acid bacteria from fermented food products[J]. Current Microbiology,2011,62(3):1081-1089.

[38] FROST L S,LEPLAE R,SUMMERS A O,et al. Mobile genetic elements:the agents of open source evolution[J]. Nature Reviews Microbiology,2005,3(9):722-732.

[39] 罗强,张明,刘巧,等. 产细菌素屎肠球菌SC-Y112的体外益生性及安全性评价[J]. 食品科学,2021,42(11):154-160.
LUO Q,ZHANG M,LIU Q,et al. Evaluation of *in vitro* probiotic and safety properties of *Enterococcus faecium* SC-Y112 producing bacteriocin[J]. Food Science,2021,42(11):154-160.(in Chinese)

[40] PERES C M,ALVES M,HERNANDEZ-MENDOZA A,et al. Novel isolates of lactobacilli from fermented Portuguese olive as potential probiotics[J]. LWT-Food Science and Technology,2014,59(1):234-246.

[41] 王新惠,张崟,王卫,等. 四川腌腊肉制品食用安全性分析[J]. 食品工业科技,2014,35(24):49-52,56.
WANG X H,ZHANG Y,WANG W,et al. Survey and analysis of food safety in Sichuan cured meat[J]. Science and Technology of Food Industry,2014,35(24):49-52,56.(in Chinese)