赖慧婷, 刘伟, 罗艺璇, 等. 芥菜发酵用产香乳酸菌的筛选、鉴定及特性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 186−197. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020126

LAI Huiting, LIU Wei, LUO Yixuan, et al. Screening, Identification, and Characterization of Aroma-producing Lactic Acid Bacteria in Mustard Fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 186−197. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020126

·生物工程·

芥菜发酵用产香乳酸菌的筛选、鉴定及特性研究

赖慧婷[1], 刘　伟[1,2,*], 罗艺璇[1], 王新宇[1], 林树花[2], 张菊华[1,2,*]

（1.湖南大学生物学院隆平分院, 湖南长沙 410125;
2.湖南省农产品加工与质量安全研究所, 湖南长沙 410125）

摘　要: 为获得具有产香能力的乳酸菌应用于芥菜发酵生产，采用传统分离培养法从发酵蔬菜中筛选疑似乳酸菌，通过嗅闻法和乙偶姻含量分析筛选产香乳酸菌，开展菌株生长及发酵特性研究，并接种至芥菜汁中分析其挥发性香气成分。结果表明：本研究共获得 67 株乳酸菌菌株，筛到 5 株产香菌株，经形态学、生理生化和 16S rDNA 分子生物学鉴定，LJ036、LJ065、QT038 和 JC091 为植物乳植杆菌，JC045 为赫伦魏斯氏菌。LJ065 和 QT038 具有更强的产酸能力；QT038 在 pH3.5 下生长良好，且高盐耐受力略强，具有较好的耐温性；LJ036 对金黄色葡萄球菌的抑菌效果最好；LJ065 的亚硝酸盐降解能力最强，降解率为 94.45%。HS-SPME-GC-MS 挥发性成分共鉴定出 52 种，发酵组挥发性成分含量较高的有醇类、醛类和酮类，其中 QT038、LJ065 和 LJ036 发酵组的乙偶姻含量较高，分别为 4.27、3.11、3.80 μg/mL。聚类热图分析显示 QT038、LJ065 和 LJ036 发酵芥菜汁中（Z）-2-己烯-1-醇、大马士酮、（Z）-3-己烯-1-醇、2-乙基苯酚和乙酸芳樟酯等挥发性成分含量较高，赋予芥菜更为浓郁的花香、果香及草木香。综合评价，QT038、LJ065 和 LJ036 具备较好的发酵及产香特性，有望为芥菜接种发酵提供菌株支持。

关键词: 芥菜, 乳酸菌, 乙偶姻, 菌株鉴定, 生长特性

中图分类号: TS255.54　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0186−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020126　　本文网刊:

Screening, Identification, and Characterization of Aroma-producing Lactic Acid Bacteria in Mustard Fermentation

LAI Huiting[1], LIU Wei[1,2,*], LUO Yixuan[1], WANG Xinyu[1], LIN Shuhua[2], ZHANG Juhua[1,2,*]

（1.Longping Branch, College of Biology, Hunan University, Changsha 410125, China;
2.Hunan Institute of Agricultural Product Processing and Quality Safety, Changsha 410125, China）

Abstract: To obtain lactic acid bacteria (LAB) with aroma-producing capabilities for application in mustard fermentation, traditional isolation and culturing methods were employed to screen presumptive LAB strains from fermented vegetables. Aroma-producing LAB were selected using sniffing test and diacetyl content analysis. Growth and fermentation characteristics of the strains were studied, and they were inoculated into mustard juice to analyze volatile aroma components. The results showed that: A total of 67 LAB strains were isolated, from which 5 aroma-producing strains were screened. Based on morphological, physiological, biochemical, and 16S rDNA molecular identification, strains LJ036, LJ065, QT038, and JC091 were identified as *Lactiplantibacillus plantarum*, while JC045 was identified as *Weissella hellenica*. LJ065 and QT038 exhibited stronger acid-producing capabilities. QT038 grew well at pH3.5, showed slightly

收稿日期: 2025−02−20

基金项目: 湖南省重点研发计划（2023NK2039）; 2024 年湖南辣椒优势特色产业集群; 洞庭实验室专项（2025-DTPY-001）, 湖南省农科院农创新资金团洲坑（2025CX07）, 湖南省农农科院农业科技创新资金（所长基金）（2025CX69）。

作者简介: 赖慧婷（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬发酵加工, E-mail: 2297937695@qq.com。

*** 通信作者:** 刘伟（1983−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工及综合利用, E-mail: liuwei0505@126.com。
张菊华（1971−）, 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬发酵加工, E-mail: 498282528@qq.com。

higher salt tolerance, and demonstrated good temperature tolerance. LJ036 exhibited the strongest antibacterial effect against *Staphylococcus aureus*. LJ065 possessed the highest nitrite degradation ability, with a degradation rate of 94.45%. HS-SPME-GC-MS (headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry) identified 52 volatile compounds. The fermented groups contained higher levels of alcohols, aldehydes, and ketones. Among them, the QT038, LJ065, and LJ036 fermentation groups showed higher acetoin contents of 4.27, 3.11, and 3.80 μg/mL, respectively. Cluster heatmap analysis revealed higher levels of volatile components such as (Z)-2-hexen-1-ol, damascenone, (Z)-3-hexen-1-ol, 2-ethylphenol, and linalyl acetate in QT038, LJ065, and LJ036 fermented mustard juice, imparting more intense floral, fruity, and herbaceous notes to the mustard greens. Comprehensive evaluation indicated that QT038, LJ065, and LJ036 possessed favorable fermentation and aroma-producing characteristics and showed promise as potential starter cultures for inoculated fermentation of mustard.

Key words: mustard greens; lactic acid bacteria; acetoin; strain identification; growth characteristics

芥菜(*Brassica juncea*)属于十字花科植物，是一年生草本植物[1]。芥菜营养丰富，含有大量的膳食纤维、叶绿素、*β*-胡萝卜素、抗坏血酸、矿物质和挥发性成分等[2−3]，同时富含生物活性成分，如硫代葡萄糖苷及其降解产物和多酚(类黄酮和花青素)。发酵芥菜因其口感脆嫩和风味鲜美，具有多种健康益处和疾病预防作用[4−5]，受到消费者的喜爱。

发酵蔬菜的风味源于微生物群的代谢活动、菌群之间以及与非生物环境(原料、盐、温度)的相互作用，非生物环境通过影响微生物活性、群落结构及相互作用来影响风味[6−7]。自然发酵蔬菜大多依赖于原料中自带的乳酸菌(Lactic acid bacteria)进行发酵，如肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)、粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)、乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*)以及植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)等[8]。华容大叶芥菜在不同的盐浓度下发酵，其主要的细菌种类包括乳杆菌属(*Lactobacillus*)、片球菌属(*Pediococcus*)和棒状杆菌属(*Corynebacterium*)等[9]。不动杆菌属(*Acinetobacter*)、普兰久浩酵母属(*Guehomyces*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和魏斯氏菌属(*Weissella*)则是泡青菜发酵过程中风味形成的关键微生物[10]。但目前传统芥菜发酵大多采用高盐保坯工艺，发酵风味不足，同时由于周期长，风味品质不稳定，特定的植物乳植杆菌对芥菜的品质和代谢产物产生显著的影响，筛选适宜的菌株可进一步丰富腌制芥菜的风味多样性[11]。

发酵芥菜中主要的风味成分包括醇类、醛类、酯类、酸类、酮类以及含硫和含氮的化合物，其中乙醛、乙偶姻及双乙酰等是乳酸菌发酵腌制品的主要芳香来源[12]。而乙醛在发酵过程中容易被进一步代谢为其它物质，如乙醇；双乙酰的生成途径较为复杂且在某种情况下可能会产生不良风味，这两种物质作为筛选指标都不够理想[13]。乙偶姻(Acetoin, 3-hydroxy-2-butanone)具有令人愉快的牛奶味、奶油味、甜香味[14]，可由二乙酰基和 2,3-丁二醇转化合成、丁酮水解或醛直接合成，也可以由微生物产生(例如，在奶酪和酒精发酵过程中乳酸菌、酵母代谢生成乙偶姻)[15−16]，在发酵过程中具有较高的稳定性和积累性，容易检测和监控，因此作为筛选产香乳酸菌指标更为合适。有研究从香椿中筛选产香菌株，该菌株发酵后乙偶姻含量显著提升至 714.6 mg/kg[17]；乙偶姻随腌菜腌渍时间的延长，含量增加[18]。因此，发酵芥菜行业急需挖掘具有优良风味特性的发酵菌株，如分离高产乙偶姻的乳酸菌菌株制备优良发酵剂并应用于蔬菜发酵，从而提升发酵芥菜的品质风味。

本研究从发酵蔬菜中分离乳酸菌，采用感官嗅闻和产乙偶姻能力(肌酸比色法)综合考量，获得产香优良的菌株，再经形态学、生理生化和 16S rDNA 分子生物学鉴定，同时探究乳酸菌的生长曲线、耐盐、耐酸、耐温、抑菌、降解亚硝酸盐特性及抗氧化特性，分析其发酵芥菜汁的产香特性，获得产香和生长特性优良的乳酸菌。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜大叶芥菜　湖南洞庭明珠食品有限公司提供；发酵蔬菜及泡菜汁　收集于湖南省华容县、新宁县、保靖县等 78 份；大肠杆菌、金黄色葡萄球菌　湖南省农产品加工与质量安全研究所实验室保存；葡萄糖(D(+)-葡萄糖，一水)、氯化钠、对氨基苯磺酸、铁氰化钾、乙酸锌、肌酸(一水)、亚硝酸钠、磷酸氢二钾、硼砂　国药集团化学试剂有限公司；N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐　天津市化学试剂研究所有限公司；酵母浸粉　广东环凯微生物科学研究所；丙三醇　西陇化工股份有限公司；环己酮、甲醇　色谱纯，德国 Merck 公司；1-萘酚　北京沃凯生物科技有限公司；邻苯二胺　麦克林化学试剂有限公司；0.1 mol/L 盐酸标准溶液　深圳市博林达科技有限公司；乙偶姻标准品，上海阿拉丁生物化学科技有限公司；革兰氏染色试剂盒、VP 试剂、30% 过氧化氢　广东环凯微生物科学研究所；DPPH 法试剂盒、ABTS 法试剂盒、FRAP 试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司；Ezup 柱式细菌基因组 DNA 抽提试剂盒　生工生物工程(上海)股份有限公司；MRS 肉汤培养基、LB 琼脂培养基　广东环凯微生物科学研究所；改良 MRS 琼脂培养基　广州华润科技有限公司；MRS-$NaNO_2$ 培养基：每 1 L 水中加入 54 g 的 MRS 肉汤，加热搅拌溶解，pH 调至 6.8，再加入 5 mg $NaNO_2$，含 $NaNO_2$ 浓度为 200 mg/L。

PHS-3C 型 pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司; WP-UP-WF-20 型超纯水制备机　四川沃特尔水处理设备有限公司; SW-CJ-1B 型超净工作台　苏州净化设备有限公司; LX-B100 L 型立式压力蒸汽灭菌锅　合肥华泰有限公司; SPX-150 型生化培养箱　中仪国科(北京)科技有限公司; Synergy H1 型酶标仪　美国 Bio-Tek 公司; Avanti J-26XP 冷冻离心机　美国 Beckman 公司; 50/30 μm 固相萃取仪　德国 CNW 公司; 7890A-5975C 型气相色谱-质谱(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用仪　美国 Agilent 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　乳酸菌的分离、纯化　发酵蔬菜或泡菜汁分别取 1 g(mL)于 10 mL MRS 肉汤培养基, 37 ℃ 培养 1 d, 培养液经梯度稀释后, 从 10^{-3}、10^{-4}、10^{-5}、10^{-6} 稀释梯度中分别吸取 0.1 mL 涂布在 MRS 固体培养基上, 37 ℃ 培养 2~3 d。用接种环选取单菌落进行平板划线分离, 纯化 2~3 次。

1.2.2　乳酸菌初筛　菌株活化后, 进行革兰氏染色和过氧化氢酶试验, 选取疑似乳酸菌、无芽孢、革兰氏阳性和过氧化氢接触酶阴性的菌株保存。

1.2.3　产香乳酸菌的筛选

1.2.3.1　芥菜汁制作工艺流程与感官评定标准　发酵芥菜汁制作工艺流程如图 1 所示。参考张佳等[19] 感官评定标准, 选 6 名经过培训具有感官评定背景的人员, 评定方法如下: 以未接种芥菜汁为对照(CK), 采用嗅闻法对不同的发酵芥菜汁打分。评分标准: 0~3 分: 无明显发酵香气或有异味; 4~7 分: 有正常发酵香气; 8~10 分: 有浓郁发酵香气(每个样品评 3 次)。同时用 pH 计测定 pH。

1.2.3.2　发酵芥菜汁中乙偶姻测定　采用肌酸比色法[20] 测定发酵芥菜汁中的乙偶姻。准确称取 2.5 g 乙偶姻, 定容至 50 mL 容量瓶中, 配制成质量浓度为 50 mg/mL 的乙偶姻标准溶液, 并稀释至不同倍数。以乙偶姻质量浓度(X)为横坐标, 530 nm 处吸光值(Y)为纵坐标绘制标准曲线, 获得标准曲线回归方程 $Y=0.0186X-0.0052$, $R^2=0.9990$。

取 5 mL 发酵液用蒸馏水定容至 50 mL, 混匀后静置 30 min, 取上清液于 8000 r/min 离心 10 min, 取离心后的上清液 3 mL, 加入 1 mL 的 5% 1-萘酚, 1 mL 的 0.5% 肌酸, 振荡 2 min, 37 ℃ 下反应 60 min, 红色为阳性反应, 未变色则为阴性反应。以不接菌种作为空白对照, 测定反应液在 530 nm 处吸光值(A), 利用标准曲线回归方程计算乙偶姻含量。

1.2.4　产香乳酸菌的鉴定

1.2.4.1　形态学鉴定　将获得的高产乙偶姻菌株和嗅闻香气好综合评价优的菌株接于 MRS 固体培养基中, 37 ℃ 下培养 48 h 后观察并拍照记录菌株形态特征, 经革兰氏染色后置于显微镜油镜下观察并记录。

1.2.4.2　生理生化鉴定　碳源利用能力采用法国梅里埃公司 API 50 CHL 试纸条和 API 50 CH 对筛选优产乙偶姻菌株进行鉴定, 检测菌株对 49 种不同碳源的发酵能力。按照 API 试纸条使用手册将活化后的菌株接种到试纸中, 用无菌液体石蜡封口, 记录培养 24 h 和 48 h 的结果, 利用 API LAB Plus 自动判读系统鉴定。

1.2.4.3　分子生物学鉴定　采用 CTAB 法提取菌株 DNA。16S rDNA 扩增采用通用引物。测序引物为: 27F: AGAGTTTGATCMTGGCTCAG; 1492R: GGTTACCTTGTTACGACTT。PCR 反应体系(共 25 μL): 10×PCR Buffer, dNTP(each 10 mmol/L), Taq Plus DNA Polymerase(5 U/μL)和 50 mmol/L $MgSO_4$ 共 12.5 μL; 引物 F(10 μmol/L)1 μL; 引物 R(10 μmol/L)1 μL; Template(DNA)1 μL; ddH_2O 9.5 μL。PCR 反应体系为: 95 ℃ 预变性 5 min; 94 ℃ 变性 30 s; 57 ℃ 退火 30 s; 72 ℃ 延伸 90 s, 共循环 30 次; 最后 72 ℃ 延伸 10 min。将筛选出的菌株经 2~3 次纯化出单菌落送至生工生物工程(上海)股份有限公司测序, 将测序结果与 NCBI 中 GenBank 数据库进行 BLAST 对比, 采用 MEGA 7.0 构建系统发育树。

1.2.5　产香乳酸菌的菌种特性研究

1.2.5.1　生长曲线和产酸能力测定　将活化后的菌株以 2% 接种量接种于 MRS 肉汤培养基中 37 ℃ 培养 24 h, 以 MRS 培养基为空白, 每 2 h 用酶标仪测定 600 nm 处吸光值(A)以及测定 pH, 每组 3 平行。

1.2.5.2　耐盐能力测定　将活化好的菌株以 2% 接种量分别接至含 60、80、100、120、140 g/L NaCl 的 MRS 液体培养基中, 37 ℃ 培养 24 h, 测定 600 nm 处吸光值(A), 每组 3 平行。

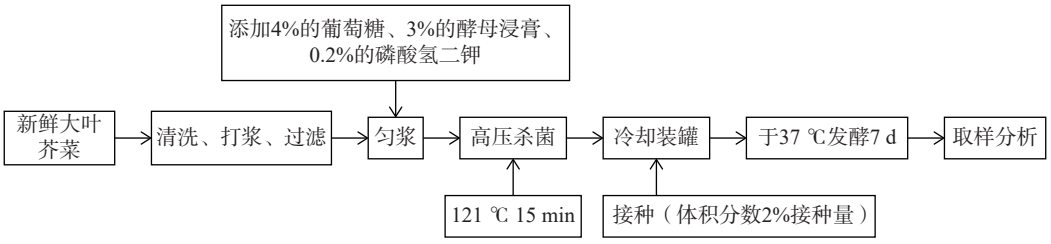


图 1　发酵芥菜汁制备工艺

Fig.1　Process of preparing fermented mustard juice

1.2.5.3　耐酸能力测定　将活化好的菌株以 2% 接种量分别接至 pH2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 的 MRS 液体培养基中，37 ℃ 培养 24 h，测定 600 nm 处吸光值（A），每组 3 平行。

1.2.5.4　温度耐受性分析　将活化好的菌株以 2% 接种量分别接至 MRS 液体培养基中，于 4、37、45 ℃ 培养 24 h，测定 600 nm 处吸光值（A），每组 3 平行。

1.2.5.5　抑菌能力测定　选取大肠杆菌（*Escherichia coil*）、金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）作为指示菌。采用琼脂扩散法[21] 检测乳酸菌的抑菌能力，测量抑菌圈直径并按公式计算抑菌能力（Antimicrobial Unit，AU）。

$$AU = \pi(d_1^2 - d_0^2)/4V$$

式中：AU：抑菌能力，mm^2/mL；d_1：抑菌圈直径，mm；d_0：琼脂孔径，7.5 mm；V：抑菌液体积，0.2 mL。

1.2.5.6　降解亚硝酸盐能力测定　参照郭志华等[22] 的方法，以不接种含亚硝酸盐的 MRS 培养基为空白对照，并测定反应液 538 nm 处吸光值（A）。按公式计算菌株的亚硝酸盐降解率：

$$\text{亚硝酸盐降解率}(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

式中：C_0 和 C_1 分别为培养基中 $NaNO_2$ 的含量和接种菌株发酵后 $NaNO_2$ 的含量。

1.2.6　抗氧化活性测定　待测样品：将各菌株接入 MRS 肉汤培养基中，37 ℃ 培养 24 h 后，于 4 ℃、5000 r/min 离心 10 min，取上清液待测。

1.2.6.1　DPPH 自由基清除率测定　采用总抗氧化活性（DPPH）试剂盒（微量法）进行测定。空白：试剂盒中提取液 20 μL 与 380 μL DPPH 溶液混合。测定：取上清液 20 μL 与 380 μL DPPH 溶液充分混匀。室温避光反应 20 min，取 200 μL 测定 515 nm 处吸光值（A）。按公式计算 DPPH 自由基的清除率：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \frac{A_{空白} - A_{测定}}{A_{空白}} \times 100$$

1.2.6.2　$ABTS^+$ 自由基清除率测定　采用总抗氧化活性（ABTS）试剂盒（微量法）进行测定。空白：试剂盒中提取液 10 μL 与 190 μL ABTS 溶液混合。测定：取上清液 10 μL 与 190 μL ABTS 溶液充分混匀。需 10 min 内测定 734 nm 处吸光值（A）。按公式计算 $ABTS^+$ 自由基的清除率：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \frac{A_{空白} - A_{测定}}{A_{空白}} \times 100$$

1.2.6.3　FRAP 还原能力测定　混合液制备（现配现用）：由 0.3 mol/L 醋酸缓冲盐、10 mmol/L 2,4,6-三（2-吡啶基）-1,3,5-三嗪和 20 mmol/L $FeCl_3$ 溶液按 10∶1∶1 的比例混合，使用前 37 ℃ 预温。

采用总抗氧化活性（FRAP）试剂盒（微量法）进行测定。空白：试剂盒中提取液 10 μL 和 190 μL 混合液混匀。测定：取上清液 10 μL 与 190 μL 混合液充分混匀。反应 20 min，测定 593 nm 处吸光值（A）。还原力以 Trolox 为标准，以 mmol Trolox/L 表示，按公式计算样品对铁离子的还原能力：

$$\text{FRAP还原力}(\text{mmol Trolox/L}) = (A_{测定} - A_{空白} - 0.0134) \times 0.8054$$

1.2.7　挥发性香气成分测定　采用 SPME-GC-MS[23] 对发酵芥菜汁的香气成分进行富集测定。取 5 mL 芥菜汁至 20 mL 顶空萃取瓶中，随后加入 0.85 g NaCl 和 10 μL 内标物（环己酮浓度为 18.94 μg/mL），于 40 ℃、500 r/min 平衡 30 min。萃取头于 250 ℃ 老化 1 h，萃取头在 40 ℃ 下萃取 1 h，随后取出并插入 GC 仪进样口，250 ℃ 解析 5 min 后检测。采用 DB-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）分离挥发性化合物；载气为氦气（1.2 mL/min），程序升温：40 ℃ 以 3 ℃/min 速度升至 100 ℃，再以 5 ℃/min 升至 200 ℃，最后以 10 ℃/min 升至 260 ℃；质谱采用 70 eV 电子电离，离子源和传输线温度分别为 230 ℃ 和 280 ℃；检测采用扫描方式，检测距离为 50~550 m/z。利用 GC-MS 分析软件分析，通过比对 NIST 2011 质谱库匹配度、CAS 号、各峰值保留时间对挥发性香气化合物进行定性，采用内标物定量，计算各发酵芥菜汁中香气成分的含量。

$$\text{香气成分含量}(\mu g/mL) = \frac{\text{香气峰面积}}{\text{内标的峰面积}} \times \text{内标的浓度}$$

1.3　数据处理

所有实验均进行 3 次重复，结果以平均数±标准差表示。采用 IBM SPSS 25.0 和 Origin Pro 2024 软件进行方差分析和作图。$P<0.05$ 表示为差异有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　乳酸菌初筛

发酵芥菜、辣椒等发酵蔬菜经梯度稀释后，于 MRS 固体培养基培养，共筛得疑似乳酸菌 88 株。对筛得的 88 株疑似乳酸菌菌株进行革兰氏染色和过氧化氢接触酶实验，获得革兰氏染色呈阳性且接触酶阴性的 67 株菌。

根据消费者感官偏好的重要性，香气浓郁、典型乳酸发酵香味是重要的评价指标[24]。通过嗅闻法得到有浓郁发酵香气菌株 25 株，有正常发酵香气菌株 34 株，无明显发酵香气或有异味菌株 8 株；产酸能力强（pH≤3.50）有 5 株，分别是 LJ036、LJ065、LJ071、DJ001 和 LJ033；pH3.50~3.60 的有 15 株；pH3.60~3.70 的最多，有 23 株。结果得到优良菌株 40 株，均具有浓郁发酵香气或正常发酵香气，且发酵芥菜汁后 pH 小于 3.70。

2.2　高产乙偶姻菌株初筛与复筛

采用肌酸比色法，在碱性条件下，发酵液与肌酸混合液变成红色则表明该菌株具有产乙偶姻的能力[25]。显色反应结果见图 2（A），在 40 株乳酸菌中

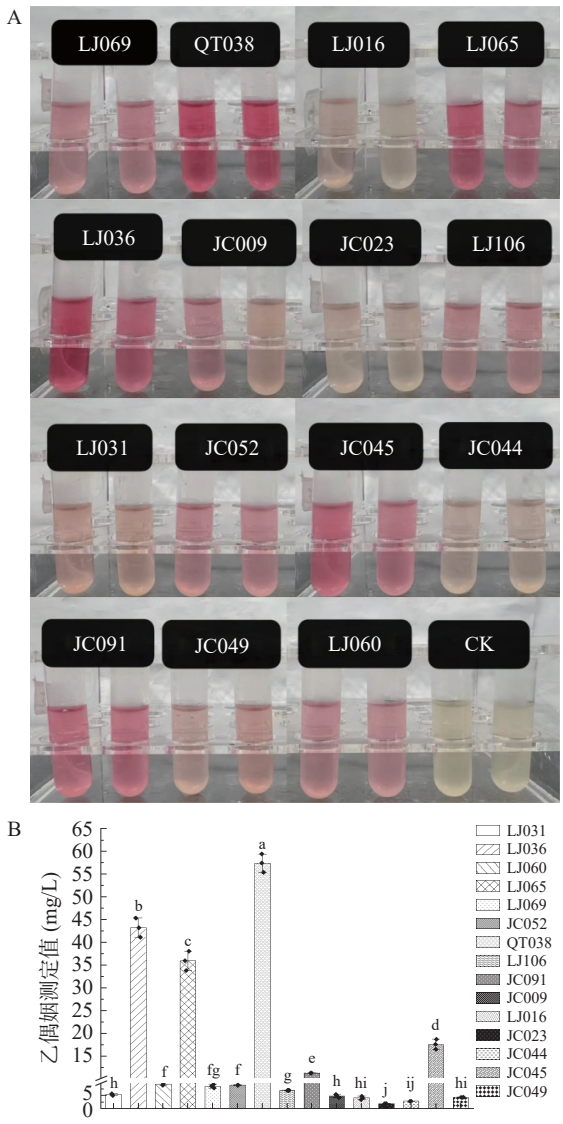


图 2　15 株菌的乙偶姻显色反应(A)和测定值(B)

Fig.2　Acetoin color reaction (A) and measured value (B) of 15 strains

注: 不同小写字母表示有显著性差异, $P<0.05$。

有 15 株菌株呈现粉色至深红色。

将肌酸比色法得到显色深的菌株进行乙偶姻含量的测定。图 2(B)所示为 15 株菌株的乙偶姻测定值, 其中乙偶姻含量较高的有 QT038、LJ036、LJ065、JC045 和 JC091, 含量分别为 57.50、43.29、36.03、17.68 和 11.42 mg/L, 均高于 10 mg/L。综合考量乳酸发酵香气好、pH 低以及高乙偶姻含量的菌株, 选择 LJ036、LJ065、QT038、JC091 和 JC045 这 5 株菌株进行后续实验研究。

2.3　产香乳酸菌鉴定

2.3.1　形态学鉴定　菌株 LJ036、LJ065、QT038、JC091 和 JC045 的菌落形态以及光学显微镜下成像如图 3 所示, 菌落中等大小, 形态均呈圆形、表面光滑、边缘整齐, 颜色呈白色, 革兰氏染色皆为阳性, 且于光学显微镜下菌株形态均呈杆或短杆状, 推测这 5 株菌均属于乳杆菌属。

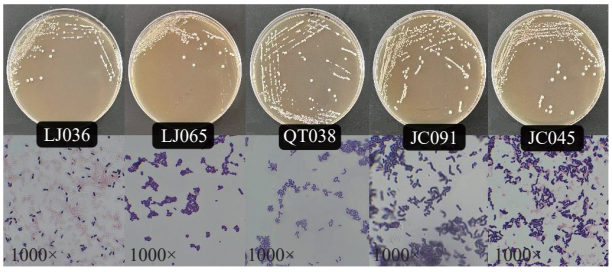


图 3　5 株菌的形态和革兰氏染色结果

Fig.3　Colony morphology and Gram staining result of 5 strains

2.3.2　生理生化鉴定　利用 API 50 CH 微生物生化鉴定系统测定菌株对 49 种碳源的利用能力, 将对照作为阴性, 底物可以利用的反应结果作为阳性, 试验结果见表 1, 于法国梅里埃公司官网利用 API LABPlus 自动判读系统对其进行鉴定, 初步鉴定 LJ036、LJ065、QT038、JC091 和 JC045 均为植物乳植杆菌, 但仅通过生理生化还不能精确判断, 因此还需要进行分子生物学鉴定。

表 1　生理生化结果

Table 1　Physiological and biochemical results

序号	项目	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045	序号	项目	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045
1	阴性对照	−	−	−	−	−	26	七叶灵	+	+	+	+	+
2	丙三醇	−	−	−	−	−	27	水杨苷	+	+	+	+	+
3	赤藓糖醇	−	−	−	−	−	28	D-纤维二糖	+	+	+	+	+
4	D-阿拉伯糖	−	−	−	−	−	29	D-麦芽糖	+	+	+	+	+
5	L-阿拉伯糖	+	+	+	+	+	30	D-乳糖	+	+	+	+	+
6	D-核糖	+	+	+	+	+	31	D-密二糖	+	+	+	+	−
7	D-木糖	−	−	−	−	+	32	D-蔗糖	+	+	+	+	+
8	L-木糖	−	−	−	−	−	33	D-海藻糖	+	+	+	+	+
9	D-核糖醇	−	−	−	−	−	34	菊粉	−	−	−	−	−
10	甲基-β-D吡喃木糖苷	−	−	−	−	−	35	D-松三糖	+	+	+	+	−
11	D-半乳糖	+	+	+	+	+	36	D-棉子糖	−	−	−	−	−
12	D-葡萄糖	+	+	+	+	+	37	淀粉	−	−	−	−	−
13	D-果糖	+	+	+	+	+	38	糖原	−	−	−	−	−
14	D-甘露糖	+	+	+	+	+	39	木糖醇	−	−	−	−	−

续表 1

序号	项目	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045	序号	项目	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045
15	L-山梨糖	−	−	−	−	−	40	D-龙胆二糖	+	+	+	+	+
16	L-鼠李糖	+	+	+	+	−	41	D-土伦糖	+	+	+	+	−
17	卫矛醇	−	−	−	−	−	42	D-来苏糖	−	−	−	−	−
18	肌醇	−	−	−	−	−	43	D-塔格糖	−	−	−	−	−
19	甘露醇	+	+	+	+	+	44	D-岩藻糖	−	−	−	−	−
20	山梨醇	+	+	+	+	−	45	L-岩藻糖	−	−	−	−	−
21	甲基-α-D-吡喃甘露糖苷	+	+	+	+	−	46	D-阿拉伯醇	−	−	−	−	−
22	甲基-α-D-吡喃葡萄糖苷	−	−	−	−	−	47	L-阿拉伯醇	−	−	−	−	−
23	N-乙酰葡萄糖胺	+	+	+	+	+	48	葡萄糖酸钾	+	+	+	+	−
24	苦杏仁苷	+	+	+	+	+	49	2-酮基葡萄糖酸钾	−	−	−	−	−
25	熊果苷	+	+	+	+	+	50	5-酮基葡萄糖酸钾	−	−	−	−	−

注：表中+代表阳性，−代表阴性。

2.3.3　分子生物学鉴定　LJ036、LJ065、QT038、JC091 和 JC045 菌株的 16S rDNA 基因 PCR 扩增结果如图 4 所示，条带亮度清晰，基因片段大小为 1500 bp 左右，测序结果得到片段长分别为 1503、1530、1529、1530、1512 bp，具有典型的 16S rDNA 特征，符合测序要求。

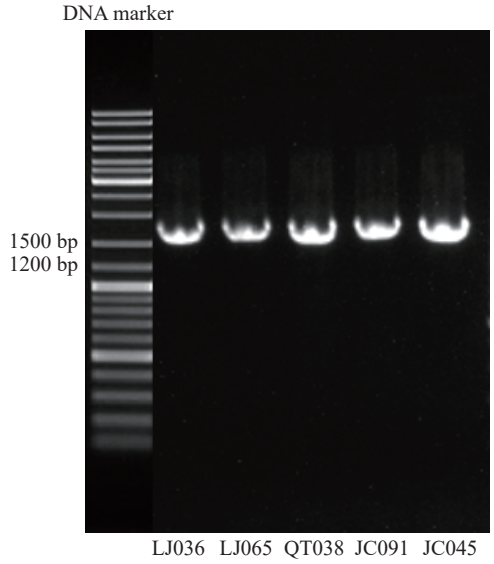


图 4　16S rDNA 结果

Fig.4　Results of 16S rDNA

运用 BLAST 同源性分析基因测序结果，构建系统发育树，结果见图 5，其中 LJ036、LJ065、QT038 和 JC091 菌株在同一进化分支，且与乳植杆菌属模式菌株中的植物乳植杆菌 NR 025447.1 同源性最高；菌株 JC045 与魏斯氏菌属模式菌株中的赫伦魏斯氏菌 NR118771.1 同源性最高。基于 API 系统对罕见菌或新物种的鉴定能力有限，再结合形态学及生理生化实验结果，最终鉴定 LJ036、LJ065、QT038 和 JC091 菌株为植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*），JC045 菌株鉴定为赫伦魏斯氏菌（*Weissella hellenica*）。

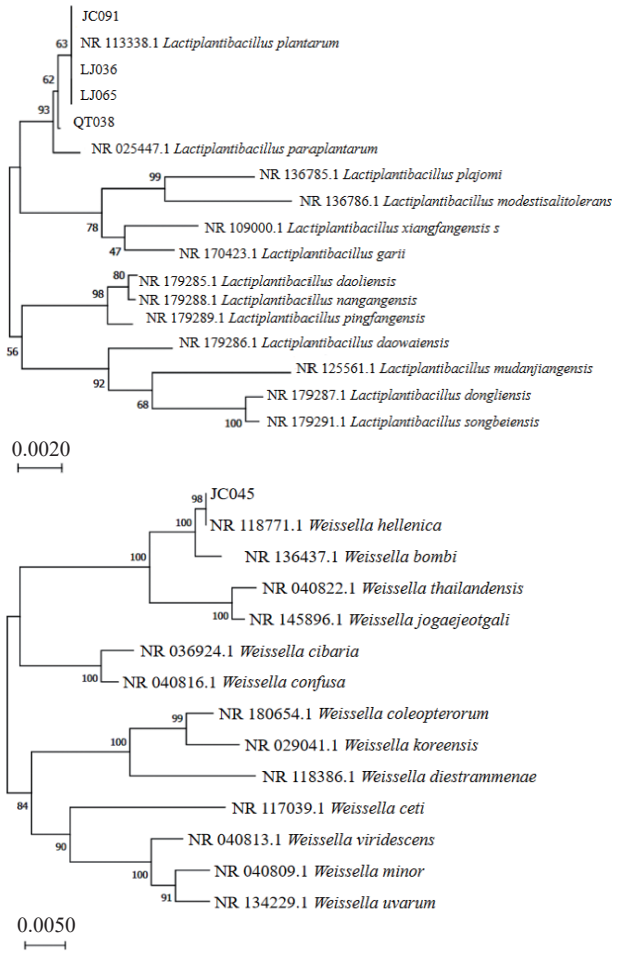


图 5　菌株系统发育树

Fig.5　Phylogenetic tree of strains

2.4　产香乳酸菌生长特性分析

2.4.1　生长曲线和产酸能力测定　测定菌株的生长曲线，可以了解菌株生长过程中的活力变化，确定菌株较优培养时间，直观评价菌株的发酵性能[26]。菌株的生长曲线及产酸测定结果见图 6，5 株菌在 MRS 肉汤中均生长良好，0~2 h 时，生长比较缓慢，处于迟缓期，2~8 h 快速生长，进入对数生长期，8 h 后所有乳酸菌到达稳定期，600 nm 处吸光值一直保持较高水平，20~24 h 进入衰亡期。其中，菌株 QT038 在 20 h 时吸光值相对较高。

菌株的产酸能力是评价发酵剂的重要指标之一，

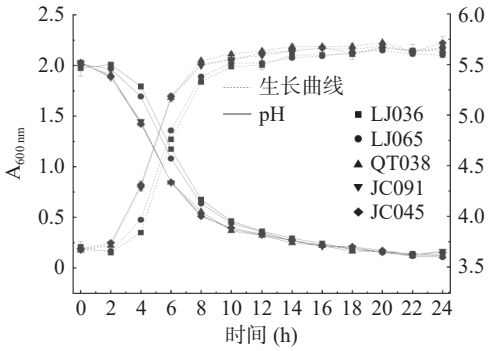


图 6 5 株菌的生长曲线和 pH

Fig.6 Growth curve and pH of 5 strains

影响发酵蔬菜的风味和稳定性[27]。图 6 可看出菌株产酸与生长同步，在 2~8 h 时 pH 快速下降，LJ036、LJ065、QT038、JC091 和 JC045 发酵终点的 pH 分别为 3.62、3.60、3.60、3.66 和 3.64，LJ065 和 QT038 菌株表现相对较强的产酸能力。生长和产酸速度是选择菌株作芥菜发酵剂的两个重要因素，5 株菌均在 2 h 后进入对数生长期，同时大量产酸，能迅速占据发酵初期优势地位，保证发酵质量。

2.4.2 耐盐性 乳酸菌发酵蔬菜需加入一定食盐以增加产品的风味、脆度及贮藏性，因此乳酸菌对食盐的耐受性是评价菌株的一个重要指标[28]。不同 NaCl 浓度下各菌株生长情况如表 2 所示，5 株菌株的生长随 NaCl 浓度升高吸光值呈下降趋势，60 g/L NaCl 浓度生长几乎不受影响，600 nm 处吸光值均大于 1.7；80 g/L NaCl 浓度下吸光值为 1.100~1.381，其中 LJ036 耐盐能力相对较弱；超过 100 g/L NaCl 浓度对菌株影响较大，5 株菌生长明显受到抑制，相比之下，QT038 在高盐条件下耐受力略强。5 株菌均可以用于芥菜的低盐(≤80 g/L NaCl)接种发酵，如需提升菌株的高盐耐受性，还要在高盐环境中逐步驯化。

2.4.3 耐酸性 菌株耐酸存活率越高，在人体胃肠道消化系统中越能较好地发挥作用。5 株乳酸菌的耐酸实验结果如图 7，随着 pH 的降低，5 株菌生长呈下降趋势。pH4.0 对菌株生长影响小；pH3.5 下 JC091 和 QT038 生长良好；当 pH≤3.0 时仍能生长，但表现出较弱的 pH 耐受性；发酵芥菜 pH3.5~4.0，会对菌株有一定的抑制作用。结合 2.4.1 中产酸能力发现，产酸能力强的 LJ065 和 QT038，耐酸能力不是最优；而耐酸能力较强的 JC091 的产酸能力也不是最强。因此，菌株的产酸与耐酸之间是否具有关联性还有待研究。

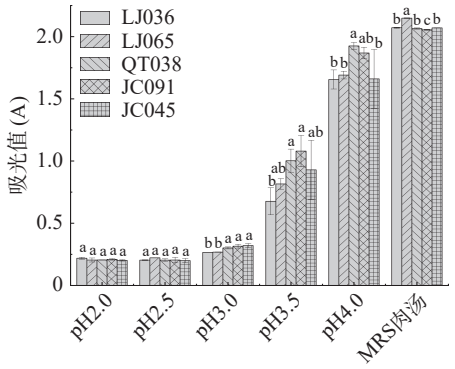


图 7 不同 pH 下各菌株的生长情况

Fig.7 Growth of the strains at different pH

注：同 pH，不同小写字母表示有显著性差异，$P<0.05$。

2.4.4 耐温性 将各菌株接种于 MRS 培养基中，在不同温度下培养发酵 24 h 后，测得各发酵液在 600 nm 下的吸光值，从表 3 可看出，5 株乳酸菌株均在 37 ℃ 温度下生长旺盛，发酵液吸光值均在 2.2 左右，且 5 株菌株表现无显著差异；在 4 ℃ 中表现出明显的生长抑制，QT038 和 JC091 表现相对良好的耐低温特性；45 ℃ 下 LJ065 和 QT038 的高温耐受性更好。可见过高或过低的温度均会抑制乳酸菌的生长，可能影响发酵产物的形成，从而影响乳酸发酵蔬菜的品质。

表 2 乳酸菌在不同 NaCl 浓度下生长情况

Table 2 Growth of lactic acid bacteria strains in different concentrations of NaCl

食盐浓度(g/L)	菌株名称				
	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045
60	1.988±0.029^{a}	1.850±0.076^{b}	1.987±0.011^{a}	1.780±0.021^{c}	1.721±0.019^{c}
80	1.100±0.058^{d}	1.381±0.017^{a}	1.370±0.080^{ab}	1.251±0.013^{bc}	1.245±0.029^{c}
100	0.193±0.016^{c}	0.256±0.017^{a}	0.235±0.007^{ab}	0.227±0.008^{ab}	0.224±0.017^{abc}
120	0.169±0.016^{a}	0.182±0.008^{a}	0.183±0.007^{a}	0.182±0.006^{a}	0.179±0.013^{a}
140	0.152±0.004^{b}	0.168±0.008^{a}	0.175±0.009^{a}	0.171±0.007^{a}	0.165±0.004^{ab}

注：同一行中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，表3~表4同。

表 3 不同温度下各菌株的生长情况

Table 3 Growth of the strains at different temperatures

温度(℃)	菌株名称				
	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045
4	0.245±0.001^{c}	0.262±0.001^{c}	0.351±0^{ab}	0.368±0.003^{a}	0.315±0.001^{b}
37	2.218±0.020^{a}	2.189±0.075^{a}	2.205±0.018^{a}	2.251±0.072^{a}	2.188±0.052^{a}
45	1.821±0.087^{ab}	1.888±0.060^{a}	1.880±0.053^{a}	1.760±0.022^{b}	1.839±0.006^{ab}

2.4.5　抑菌活性　乳酸菌在发酵过程中能够分泌多种抑菌物质，如有机酸、细菌素和过氧化氢等。这些物质不仅能够有效抑制杂菌的生长，还能显著延长食品的保质期。此外，直接利用具有抑菌特性的乳酸菌作为生物保护菌，应用于发酵制品和食品原料的保鲜，已成为当前食品科学研究的热点领域[29−30]。

选取了两种常见的肠道致病菌：金黄色葡萄球菌和大肠杆菌，考察 4 株植物乳植杆菌和 1 株赫伦魏斯氏菌对两种致病菌在平板上生长的抑制作用，测定其抑菌圈直径大小并计算抑菌能力。从图 8 可以看出，LJ036 对金黄色葡萄球菌的生长呈现出了较好的抑制作用，抑菌圈直径为 23.12±1.75 mm；JC091 对大肠杆菌的生长呈现出了较好的抑制作用，抑菌圈直径为 19.20±0.53 mm。双全等[31] 从发酵酸菜中分离 14 株乳酸菌，8 株对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有抑菌作用，其中 S1-4 抑菌效果最强，抑菌圈直径分别为 19.69±0.71 mm 和 20.59±0.26 mm。图 9 可知不同菌株对两种指示菌的抑制效果存在差异，5 株乳酸菌均能抑制两种指示菌，其中 LJ036 对金黄色葡萄球菌的抑菌效果更好，JC091 对大肠杆菌的抑菌能力较强。

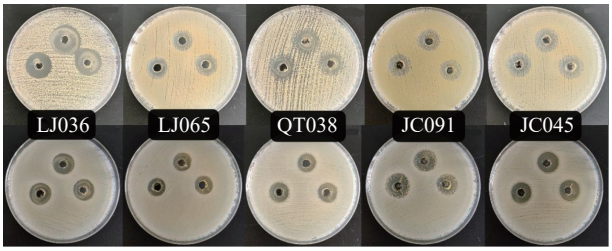


图 8　不同指示菌中各菌株的抑菌圈

Fig.8　Inhibition zones of the strains in different indicator bacteria

注：上为金黄色葡萄球菌，下为大肠杆菌。

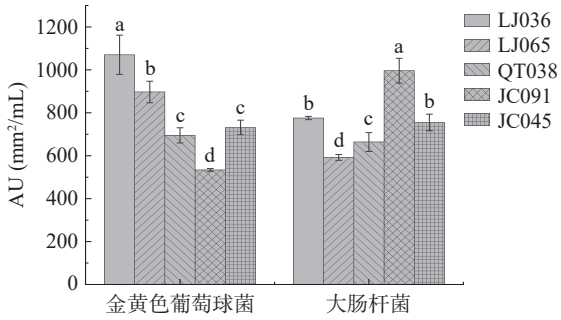


图 9　5 株菌的抑菌能力

Fig.9　Antibacterial activity of 5 strains

注：同指示菌，不同小写字母表示有显著性差异，P<0.05。

2.5　降解亚硝酸盐能力

亚硝酸盐是酱腌菜的重要安全指标之一[32]。乳酸菌是泡菜中降解亚硝酸盐效果较理想的微生物，乳酸杆菌因产酸能力强具有比乳酸球菌更优的降解亚硝酸盐能力，如植物乳植杆菌、短促生乳杆菌、发酵粘液乳杆菌等，其中植物乳植杆菌的降解效果最好[33]。5 株乳酸菌的亚硝酸盐显色结果和降解率如图 10、表 4 所示，降解率均在 85% 以上，其中 LJ065 的亚硝酸盐降解率最高为 94.45%，其次是 LJ036。陈雪梅等[34] 采用植物乳植杆菌发酵黄秋葵泡菜的亚硝酸盐含量低于自然发酵，自然发酵亚硝酸盐含量最高为 17.58 mg/kg，接种发酵亚硝酸盐含量最高为 9.78 mg/kg，且成熟期更短；杨晶[35] 筛选的 3 株植物乳植杆菌对亚硝酸盐的降解率均达到 80% 以上。

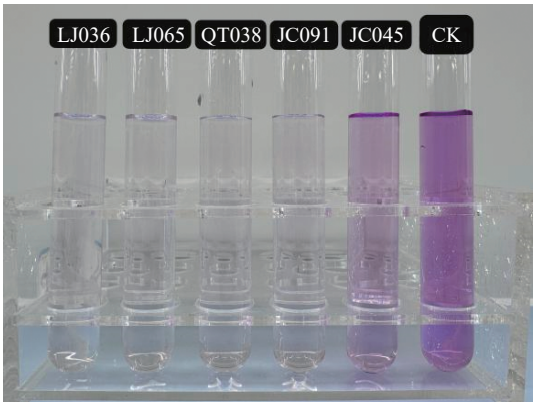


图 10　菌株的盐酸萘乙二胺显色反应效果图

Fig.10　Color reaction results of strains with hydrochloric acid 1-naphthylamine

表 4　不同菌株的亚硝酸盐降解率

Table 4　$NaNO_2$ reduction rate of different strains

菌株名称	LJ036	LJ065	QT038	JC091	JC045
降解率(%)	93.11±0.17^{b}	94.45±0.13^{a}	91.58±0.40^{c}	91.51±0.13^{c}	85.09±0.55^{d}

2.6　抗氧化特性

乳酸菌具有清除活性氧，缓解氧化损失的作用[36]，还能改善发酵食品的风味缩短发酵周期。梁小波等[37] 将高抗氧化活性发酵乳杆菌接种发酵泡菜，缩短了 2 d 左右的发酵周期并改善了风味。

由图 11 可以看出，5 株产香乳酸菌均具有一定的抗氧化活性，但不同菌株之间的抗氧化能力存在显著差异（P<0.05）。其中 5 株菌的 DPPH 自由基清除率均超过 50%，尤其 LJ065 菌株表现出更强的抗氧化活性，其清除率高达 57.16%，显著高于赵鑫等[38] 从传统泡菜中筛选菌株的 50.62%。相较其它

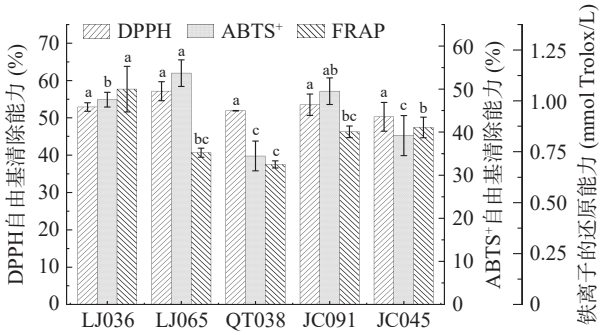


图 11　乳酸菌菌株抗氧化能力的测定结果

Fig.11　Antioxidant capacity determination results of lactic acid bacteria strains

注：同指标，不同小写字母表示有显著性差异，P<0.05。

菌株，LJ065、JC091 和 LJ036 的 ABTS$^+$自由基清除率较高，分别为 53.72%、49.52% 和 47.57%。FRAP 还原力在 0.6880~1.0054 mmol Trolox/L 之间，其中 LJ036 还原力最高为 1.0054 mmol Trolox/L，其次是 JC045 和 JC091，分别为 0.8292 mmol Trolox/L 和 0.8086 mmol Trolox/L，与卢佳音[39] 从发酵酸菜中筛选得到乳酸菌抗氧化能力结果相当。综上所述，植物乳植杆菌和赫伦魏斯氏菌具有一定的抗氧化活性，且植物乳植杆菌 LJ036 与 LJ065 的总抗氧化活性高于其他菌株。

2.7 乳酸菌发酵芥菜汁挥发性风味成分分析

2.7.1 挥发性成分组分分析 乳酸菌发酵过程中代谢糖、蛋白质及其它营养物质，生成挥发性风味物质和非挥发性滋味物质，从而形成发酵蔬菜的特征风味[40]。风味是发酵蔬菜制品给人的最直观感受，芥菜原有的“生味”和“冲味”会被独特浓郁的酸香味代替[41]。图 12(A)显示，发酵芥菜汁共鉴定出 52 种挥发性成分，其中醇类 13 种、醛类 4 种、酸类 4 种、酯类 3 种、酚类 6 种、烷类 3 种、烯类 3 种、酮类 7 种、杂环类 7 种和腈类 2 种。CK 中挥发性成分 26 种，接种发酵后均显著增加了挥发性成分的种类，其中植物乳植杆菌 LJ065 种类最多，达 42 种。从图 12(B)可以看出，乳酸菌接种发酵后的芥菜汁中各类挥发性风味化合物含量均有提高，且不同发酵组挥发性香气成分有差异。各组的醇类、醛类和酮类含量较高，如(Z)-4-己烯-1-醇、苯乙醇、2,4-二甲基苯甲醛、3-羟基-2-丁酮(乙偶姻)等挥发性香气物质。醇类的种类及相对含量占比均最高，醇类一般具有花香、芳香和水果香，可以与有机酸形成酯类物质，极大地改善发酵后产品的风味形成[42]；发酵组的醛类化合物含量均减少，LJ036、QT038 的酯类物质相对含量较高，可能是因为醛类极易被乳酸菌分解还原成醇类[43]，醇类物质的增加进而会使相应的酯类物质增加，而酯类是产生浓郁水果香味的重要物质；发酵组的酮类含量均增加，酮类多伴有果香味[44]，是植物乳植杆菌发酵过程中的第二类主要挥发性成分[45]。

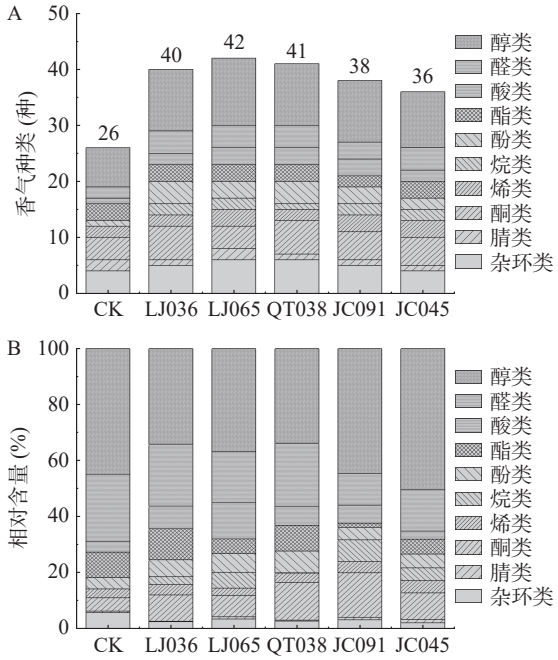


图 12 不同发酵组芥菜挥发性成分种类数(A)和含量(B)

Fig.12 Types (A) and relative content (B) in volatile components in different fermented mustard

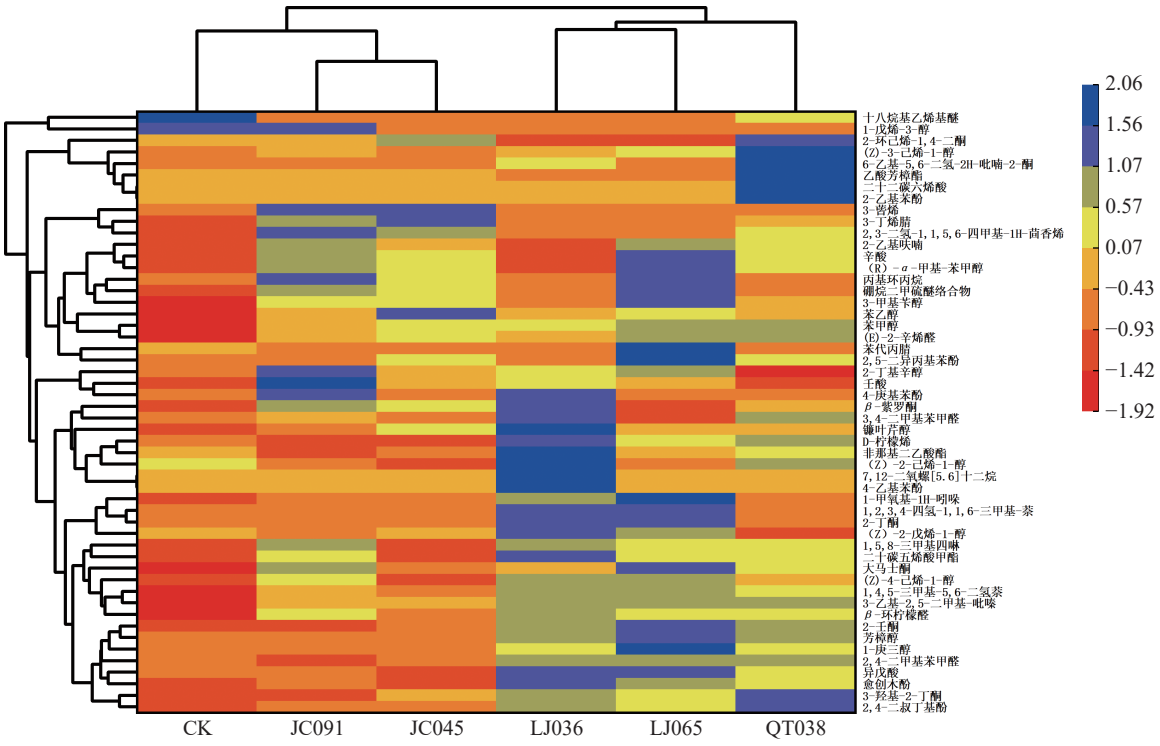


图 13 乳酸菌发酵芥菜汁的挥发性香气成分聚类热图分析

Fig.13 Cluster heat map analysis of volatile aroma compounds in mustard juice fermented by lactic acid bacteria

2.7.2　不同发酵组芥菜汁挥发性香气成分聚类热图分析　将分析鉴定出的 52 种挥发性风味物质绘制成聚类热图(图 13)，颜色越蓝表示挥发性成分含量较高，颜色越红表示挥发性成分含量越低。由图可见 CK 组和 5 种菌株发酵组的挥发性成分有显著差异，十八烷基乙烯基醚和 1-戊烯-3-醇这 2 种挥发物在 CK 组中的含量相对较高；JC091 中壬酸、3-蒈烯、1-戊烯-3-醇、2-丁基辛醇和 4-庚基苯酚等的含量相对较高，JC045 中苯乙醇、3-蒈烯和 3-丁烯腈等的含量相对较高；LJ036 中 4-庚基苯酚、β-紫罗酮、3,4-二甲基苯甲醛、D-柠檬烯、(Z)-2-己烯-1-醇、2-丁酮、(Z)-2-戊烯-1-醇、异戊酸和愈创木酚等的含量相对较高；LJ065 中辛酸、3-甲基苄醇、2-丁酮、1-庚三醇、大马士酮、2-壬酮、芳樟醇和异戊酸等的含量相对较高；QT038 中(Z)-3-己烯-1-醇、乙酸芳樟酯、2-乙基苯酚、3-羟基-2-丁酮和 2,4-二叔丁基酚等的含量相对较高。苯乙醇、1-戊烯-3-醇、3-丁烯腈及(Z)-3-己烯-1-醇等是发酵芥菜、泡菜和腌制菜中主要的挥发性成分[46−48]，β-紫罗酮、大马士酮、2-壬酮与芳樟醇等赋予发酵芥菜花香、果香[49−50]，有效中和发酵产生的部分刺激性气味，丰富其风味层次。聚类分析可以看出 JC091 和 JC045 的风味特征较为相似，且表现为 3-蒈烯含量较高、3-甲基苄醇含量居中、D-柠檬烯含量低；LJ036、LJ065 和 QT038 的风味特征较为相似，且均表现为(Z)-2-己烯-1-醇含量较高，β-环柠檬醛含量居中，1-戊烯-3-醇含量较低。

结果表明，不同乳酸菌发酵后的芥菜汁挥发性物质存在显著差异，乳酸菌发酵可以增加挥发性香气物质的种类及含量。LJ036、LJ065、QT038、JC091、JC045 菌株中均检测到 3-羟基-2-丁酮(乙偶姻)含量，赋予发酵芥菜汁的甜香、奶油香。其中 QT038、LJ065 和 LJ036 发酵后芥菜汁的乙偶姻含量较高，分别为 4.27、3.11 和 3.80 μg/mL，且其他特征挥发性成分种类较多，如(Z)-2-己烯-1-醇、大马士酮、(Z)-3-己烯-1-醇、2-乙基苯酚和乙酸芳樟酯等，这些物质香气特征为花香、果香及草木香，突显出这 3 株菌具有较强的风味形成能力。

3　结论

本研究从发酵蔬菜或泡菜中筛选得到产酸、产香、产乙偶姻含量较高的 5 株乳酸菌，经形态学、生理生化和分子生物学鉴定，LJ036、LJ065、QT038 和 JC091 为植物乳植杆菌，JC045 为赫伦魏斯氏菌。其中菌株 LJ065 和 QT038 具有较强的产酸能力；5 株菌低于 80 g/L NaCl 生长良好，QT038 耐高盐能力略强；QT038 表现出较好的耐低 pH 和耐低温；LJ065 和 QT038 表现出较好的高温耐受性；LJ036 对金黄色葡萄球菌的抑菌效果最好；LJ065 菌株的亚硝酸盐降解能力最强，降解率为 94.45%，其次是 LJ036。研究结果表明，LJ036、LJ065 和 QT038 具备良好的生长及发酵特性。

接种发酵芥菜汁共鉴定出 52 种挥发性成分，LJ065 的挥发性成分种类最高达 42 种。各组的醇类、醛类和酮类含量较高，其中醇类的种类及相对含量占比均最高，相比 CK 组，发酵芥菜汁的醛类含量均减少，但酮类含量均增加，且 LJ036 和 QT038 的酯类相对含量较高。聚类热图分析表明，5 株乳酸菌表现出不同的产香特性，尤其是 QT038、LJ065 和 LJ036 发酵后的芥菜汁中，(Z)-2-己烯-1-醇、大马士酮、(Z)-3-己烯-1-醇、2-乙基苯酚和乙酸芳樟酯等挥发性成分的含量相对较高，这些物质的香气特征为花香、果香及草木香，赋予芥菜更为浓郁的风味；QT038、LJ065 和 LJ036 发酵组的乙偶姻含量较高，分别为 4.27、3.11、3.80 μg/mL，突显出这 3 株菌具有较强的风味形成能力。本研究筛选获得的优良菌株有望为芥菜接种发酵提供有效的菌株支持。

© 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] LIN Longze, SUN Jianghao, CHEN Pei, et al. UHPLC-PDA-ESI/HRMS/MS(n) analysis of anthocyanins, flavonol glycosides, and hydroxycinnamic acid derivatives in red mustard greens (*Brassica juncea* Coss variety)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(22): 12059−12072.

[2] YOKOZAWA T, KIM H Y K, CHO E J, et al. Protective effects of mustard leaf (*Brassica juncea*) against diabetic oxidative stress[J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2003, 49(2): 87−93.

[3] 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 Xiaoyi, WANG Jianhui, DENG Na, 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.]

[4] LEE M, CHOI J H, CHOI Y S, et al. The antioxidative properties of mustard leaf (*Brassica juncea*) *kimchi* extracts on refrigerated raw ground pork meat against lipid oxidation[J]. Meat Science, 2010, 84(3): 498−504.

[5] OH S, TSUKAMOTO C, KIM K, et al. Investigation of glucosinolates, and the antioxidant activity of Dolsan leaf mustard kimchi extract using HPLC and LC-PDA-MS/MS[J]. Journal of Food Biochemistry, 2017, 41(3): e12366.

[6] WANG Zining, FENG Yunzi, YANG Nana, et al. Fermentation of kiwifruit juice from two cultivars by probiotic bacteria: Bioactive phenolics, antioxidant activities and flavor volatiles[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131455.

[7] HU Yingying, ZHANG Lang, WEN Rongxin, et al. Role of lactic acid bacteria in flavor development in traditional Chinese fermented foods: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(10): 2741−2755.

[8] LIU Aiping, LI Xiaoyan, PU Biao, et al. Use of psychrotolerant lactic acid bacteria (*Lactobacillus* spp. and *Leuconostoc* spp.) isolated from Chinese traditional Paocai for the quality improvement of Paocai products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(12): 2580−2587.

[9] 唐睿. 腌制华容大叶芥菜微生物多样性分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021. [TANG Rui. Analysis on microbial diversity of pickled Huarong Daye mustard[D]. Changsha: Hunan Agricultural

University, 2021.]
[10] 杜玫. 小叶芥菜发酵过程中风味成分及微生物多样性研究[D]. 成都: 四川大学, 2021. [DU Mei. Study on flavor components and microbial diversity of *Brassica juncea* during fermentation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.]
[11] YANG Menglu, LAI Haimei, WANG Yali, et al. Characterizing the impact of species/strain-specific *Lactiplantibacillus plantarum* with community assembly and metabolic regulation in pickled Suancai[J]. Food Research International, 2023, 174(Pt 1): 113650.
[12] 周晓媛, 夏延斌. 蔬菜腌制品的风味研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(4): 104−108. [ZHOU Xiaoyuan, XIA Yanbin. Advances of study on flavor of salted vegetable[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(4): 104−108.]
[13] 丹彤, 包秋华, 孟和, 等. 发酵乳风味物质乙醛、双乙酰的合成途径及其调控机制[J]. 食品科技, 2012, 37(7): 75−79. [DAN Tong, BAO Qiuhua, MENG He, et al. Gene regulation to increase acetaldehyde and diacetyl production by lactic acid bacteria[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(7): 75−79.]
[14] RAJENDRAN S, SILCOCK P, BREMER P. Flavour volatiles of fermented vegetable and fruit substrates: A review[J]. Molecules, 2023, 28(7): 3236.
[15] XIAO Z J, LU J R. Strategies for enhancing fermentative production of acetoin: A review[J]. Biotechnology Advances, 2014, 32(2): 492−503.
[16] XIAO Z J, LU J R. Generation of acetoin and its derivatives in foods[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(28): 6487−6497.
[17] 卢晨曦. 香椿产香内生菌的筛选鉴定及其发酵优化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [LU Chenxi. Screening and identification of endophytic for aroma production in *Toona sinensis* and its fermentation optimization[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]
[18] 赵大云, 汤坚, 丁霄霖. 雪里蕻腌菜特征风味物质的分离和鉴定[J]. 无锡轻工大学学报, 2001, 20(3): 291−298. [ZHAO Dayun, TANG Jian, DING Xiaolin. Isolation and identification of typical flavor components of potherb mustard pickles[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2001, 20(3): 291−298.]
[19] 张佳, 马永昆, 崔凤杰, 等. 乳酸菌发酵酸豆乳香气成分分析及评价[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 298−302. [ZHANG Jia, MA Yongkun, CUI Fengjie, et al. Determination and evaluation of volatile components of soymilk yoghurts fermented by lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2010, 31(20): 298−302.]
[20] 孙建平. 山西老陈醋酿造川芎嗪的生成规律及菌株代谢调控[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021. [SUN Jianping. The production law of ligustrazine brewed from Shanxi aged vinegar and the regulation of strains metabolism[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021.]
[21] 辛维岗, 江宇航, 陈诗雨, 等. 滇池金线鲃肠道产细菌素细菌的筛选鉴定及细菌素 LSP01 的抑菌作用[J]. 微生物学通报, 2022, 49(1): 242−255. [XIN Weigang, JIANG Yuhang, CHEN Shiyu, et al. Screening and identification of bacteriocin-producing bacteria in the intestines of *Sinocyclocheilus grahami* in Dianchi and the antibacterial effect of bacteriocin LSP01[J]. Microbiology China, 2022, 49(1): 242−255.]
[22] 郭志华, 王聪, 陈红玲. 红茶菌中降解亚硝酸盐乳酸菌的筛选、鉴定及其功能特性[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 309−316. [GUO Zhihua, WANG Cong, CHEN Hongling. Studies on screening, identification and functional properties of nitrite degrading lactic acid bacteria in kombucha[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(8): 309−316.]
[23] 李子怡, 王锋, 赵玲艳, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和多元统计学分析华容芥菜的特征挥发性风味成分[J]. 中国酿造, 2024, 43(3): 234−242. [LI Ziyi, WANG Feng, ZHAO Lingyan, et al. Analysis of characteristic volatile flavor components of Huarong mustard based on HS-SPME-GC-MS and multivariate statistics[J]. China Brewing, 2024, 43(3): 234−242.]
[24] KANG J H, LEE J H, MIN S, et al. Changes of volatile compounds, lactic acid bacteria, pH, and headspace gases in kimchi, a traditional Korean fermented vegetable product[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(3): 849−854.
[25] 张玲玲, 罗惠波, 黄丹, 等. 一株高产乙偶姻芽孢杆菌菌株筛选及发酵条件优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(5): 71−81. [ZHANG Lingling, LUO Huibo, HUANG Dan, et al. Screening of a *Bacillus* strain with high acetoin-producing ability and optimization of its fermentation conditions[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(5): 71−81.]
[26] 王越, 赵文谨, 谢云飞, 等. 强化发酵对诺丽果成分的影响及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 143−149,157. [WANG Yue, ZHAO Wenjin, XIE Yunfei, et al. Effects of intensified fermentation on the components of noni fruit and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 143−149,157.]
[27] 马依努尔·米吉提, 茹克叶木·阿不力米提, 力俊琛, 等. 低温风干发酵羊腿中优势乳酸菌的分离、筛选及鉴定[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 152−159. [MAYNUR Mijit, RUKEYEMU Ablikim, LI Junchen, et al. Isolation, screening and identification of dominant lactic acid bacteria from air-dried sheep legs fermented at low temperature[J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 152−159.]
[28] 张静, 张锦丽, 杨娟侠. 乳酸菌群对乳酸发酵作用的探讨[J]. 天津农业科学, 2002, 8(2): 18−20. [ZHANG Jing, ZHANG Jinli, YANG Juanxia. Discussion about effect of *Lactobillus* colony on lactic fermentation[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2002, 8(2): 18−20.]
[29] 赵永慧, 杨杰, 朱卿正, 等. 一株植物乳杆菌 MMB-03 的筛选鉴定及抑菌特性研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(17): 189−192,196. [ZHAO Yonghui, YANG Jie, ZHU Qingzheng, et al. Screening identification and bacteriostasis characteristics of *Lactobacillus plantarum* MMB-03[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(17): 189−192,196.]
[30] ULPATHAKUMBURA C P, RANADHEERA C S, SENAVIRATHNE N D, et al. Effect of biopreservatives on microbial, physico-chemical and sensory properties of Cheddar cheese[J]. Food Bioscience, 2016, 13: 21−25.
[31] 双全, 折米娜, 薄礼娟. 抑菌活性乳酸菌的筛选及其抑菌物质的提取条件优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 105−110,116. [SHUANG Quan, SHE Mina, BO Lijuan. Screening of lactic acid bacteria with antibacterial activity and optimization of extraction conditions of antimicrobial substances[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 105−110,116.]
[32] HUANG Yanyan, JIA Xiangze, YU Jiajia, et al. Effect of different lactic acid bacteria on nitrite degradation, volatile profiles, and sensory quality in Chinese traditional Paocai[J]. LWT, 2021, 147: 111597.
[33] 于华, 刘有晴, 黄丹, 等. 泡菜中高产酸、高效降解亚硝酸盐的乳酸菌分离鉴定及应用[J]. 中国调味品, 2016, 41(6): 34−38. [YU Hua, LIU Youqing, HUANG Dan, et al. Isolation and identifi-

cation of lactic acid bacteria with high acid production and efficiency degradation of nitrite in pickles[J]. China Condiment, 2016, 41(6): 34−38.]
[34] 陈雪梅, 王芳凌, 明昆洋, 等. 植物乳杆菌对黄秋葵泡菜亚硝酸盐含量的影响及其发酵工艺研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(6): 129−134. [CHEN Xuemei, WANG Fangling, MING Kunyang, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* on nitrite content in pickled okra and research on its fermentation technology[J]. China Brewing, 2022, 41(6): 129−134.]
[35] 杨晶. 植物乳杆菌 *Lactobacillus* plantarum 5-7-3 降解亚硝酸盐作用的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019. [YANG Jing. Research on the degradation of nitrite by *Lactobacillus plantarum* 5-7-3[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.]
[36] CHEN Qian, KONG Baohua, SUN Qinxiu, et al. Antioxidant potential of a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage: *In vitro* and in a sausage model[J]. Meat Science, 2015, 110: 180−188.
[37] 梁小波, 王智能, 杨伟伟, 等. 抗氧化活性乳酸菌的分离鉴定及其在泡菜发酵中的应用[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 225−233. [LIANG Xiaobo, WANG Zhineng, YANG Weiwei, et al. Isolation and identification of antioxidant lactic acid bacteria and its application in pickle fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(12): 225−233.]
[38] 赵鑫, 胡蝶, 张素平, 等. 传统泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及抗氧化特性分析[J]. 中国调味品, 2022, 47(2): 5−9. [ZHAO Xin, HU Die, ZHANG Suping, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria in traditional pickles and analysis of the antioxidant properties[J]. China Condiment, 2022, 47(2): 5−9.]
[39] 卢佳音. 发酵蔬菜中菌的分离鉴定及其益生性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. [LU Jiayin. The isolation, identification and probiotic properties of lactic acid bacteria from sauerkraut[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.]
[40] 李汴生, 卢嘉懿, 阮征. 植物乳杆菌发酵不同果蔬汁风味品质研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 293−299. [LI Biansheng, LU Jiayi, RUAN Zheng. Favor quality of different fruit and vegetable juices fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(19): 293−299.]
[41] 熊世进. 老坛酸菜功能微生物代谢调控机制及其直投式发酵关键技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024. [XIONG Shijin. Metabolism regulation mechanism of functional microbiota in Laotan Suancai and the key technology of direct vat set[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.]
[42] CHEN Chen, ZHAO Shanshan, HAO Guangfei, et al. Role of lactic acid bacteria on the yogurt flavour: A review[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): S316−S330.
[43] 余欢, 管敬喜, 杨莹, 等. 7 株野生葡萄酒酵母对‘桂葡 3 号’干白葡萄酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 251−258. [YU Huan, GUAN Jingxi, YANG Ying, et al. Effects of seven wild wine yeast strains on the aroma compounds of 'guipu 3' dry white wines[J]. Food Science, 2019, 40(4): 251−258.]
[44] 徐柳柳. 两种乳杆菌发酵西瓜汁的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. [XU Liuliu. Study on watermelon juice fermented by two kinds of *Lactobacillus*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.]
[45] 陈艳, 蒋依琳, 唐玉娟, 等. 大叶芥菜发酵过程中挥发性成分变化研究[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 90−96. [CHEN Yan, JIANG Yilin, TANG Yujuan, et al. Study on the change of volatile components in leaf mustard during fermentation[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11): 90−96.]
[46] 刘明春, 李正国, 王心宇, 等. 榨菜挥发性风味成分的分析[J]. 食品工业科技, 2010, 31(10): 118−120,123. [LIU Mingchun, LI Zhengguo, WANG Xinyu, et al. Analysis of volatile flavor compounds of pickled mustard tuber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(10): 118−120,123.]
[47] 赵大云, 黄健, 汤坚, 等. 固相微萃取法检测雪里蕻及其腌菜挥发性风味成分[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2004, 22(3): 237−245. [ZHAO Dayun, HUANG Jian, TANG Jian, et al. Analysis of volatile components in fresh potherb mustard and its pickles by solid-phase microextraction[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2004, 22(3): 237−245.]
[48] 毛雪金, 张雪, 林月敏, 等. 固相微萃取-气相色谱质谱法分析赣南脐橙挥发性风味物质[J]. 南昌大学学报(理科版), 2016, 40(4): 324−329. [MAO Xuejin, ZHANG Xue, LIN Yuemin, et al. Determination of various volatile aroma compounds in Gannan navel orange by solid phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2016, 40(4): 324−329.]
[49] 卢嘉懿. 乳酸菌发酵果蔬汁风味品质研究与控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [LU Jiayi. Changes and control on sensory quality of lactic acid bacteria fermented fruit and vegetable juices[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
[50] 吴江娜, 魏冠棉, 毛娜, 等. 不同乳酸菌发酵对雪花梨汁营养成分、抗氧化活性及挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 310−321. [WU Jiangna, WEI Guanmian, MAO Na, et al. Effects of different lactic acid bacteria fermentation on nutrient composition, antioxidant activity and volatile flavor substances of snow pear juice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 310−321.]