DOI:10.12441/spyswjs.20240705004 [文章编号] 1673-1689(2024)09-0125-08

泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及发酵工艺优化

刘振恒[1,2] 阴耕云[3] 肖 冬[3] 王 凯[3] 潘红阳[1,2] 师建全[3*]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室,江苏 无锡 214122; 3. 云南中烟工业有限责任公司,云南 昆明 650231)

摘要:为了缩短泡菜发酵周期,提高泡菜食用品质、安全性和稳定性,从市售及自制泡菜中筛选出了发酵性能优异的植物乳酸菌 6-1 和短乳杆菌 6-3。开发了以花生蛋白为氮源的食品级培养基,可直接作为乳酸菌发酵剂。优化了泡菜的发酵工艺,测定了其 pH 和亚硝酸盐质量分数、质构特性和感官品质。结果表明,在额外补加质量分数 1.0% 的花生蛋白、接种体积分数 7.5% 的植物乳杆菌 6-1 的条件下,发酵 4 d 后泡菜的 pH 降低至 3.65,亚硝酸盐未检出,硬度、弹性和咀嚼性等质构特性较好,各项感官指标得分也较高。研究结果为植物乳杆菌 6-1 在泡菜中的应用以及泡菜的工业化生产提供了理论依据。

关键词:乳酸菌筛选;食品级培养基;泡菜制备工艺;氮源补充

Screening and Identification of Lactic Acid Bacteria from Pickles and Optimization of Fermentation Process

LIU Zhenheng[1,2] *YIN Gengyun*[3] *XIAO Dong*[3] *WANG Kai*[3] *PAN Hongyang*[1,2] *SHI Jianquan*[3*]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650231, China)

Abstract: In order to shorten the fermentation cycle and improve the edible quality, safety and stability of pickle, *Lactobacillus plantarum* 6-1 and *Lactobacillus brevis* 6-3 with excellent fermentation performance were screened from commercially available and homemade pickles. A food-grade medium using peanut protein as the nitrogen source was developed, which can be used directly as a starter culture for lactic acid bacteria fermentation. The fermentation process of pickles was optimized, and the pH, nitrite mass fraction, texture characteristics, and sensory quality of pickles were measured. The results showed that under the conditions with an additional 1.0% mass fraction of peanut protein and a 7.5% volume fraction inoculating with *Lactobacillus plantarum* 6-1, after 4 days of fermentation, the pH of pickles was reduced to 3.65, no nitrite was detected, the textural properties, including hardness, elasticity, and chewiness, were significantly improved, and the scores of various sensory attributes were also high. These results provide a theoretical basis for the application of *Lactobacillus plantarum* 6-1 in pickles as well as the production of industrialized pickles.

Keywords: lactic acid bacteria screening; food grade medium; pickle production process; nitrogen source supplementation

泡菜作为我国传统发酵食品之一,由于其具有较高的营养价值和益生作用而深受消费者喜爱[1]。目前,蔬菜发酵的方式多为自然发酵,发酵周期长、发酵产品的稳定性差和安全性低等问题

基金项目:云南中烟科技项目(2024YL04,2023CP03)。

通信作者:师建全(1969—),男,博士,工程师,主要从事卷烟产品研发工作。E-mail:1751697792@126.com

收稿日期:2024-07-05 **修回日期:**2024-08-16

限制了其工业化生产[2]。接种发酵通过向发酵体系中接种特定菌株，能够更有效地控制发酵过程，提高发酵产品的营养价值、经济价值、安全性和稳定性，因此受到了越来越多研究者的青睐[3]。

筛选出具有优良发酵性能的菌株是泡菜接种发酵过程中的重要部分，大量研究证实，泡菜发酵过程中的优势菌株是乳酸菌[4]，主要包括乳杆菌属、链球菌属、片球菌属、肠杆菌属等[5]。接种乳酸菌能使发酵体系迅速酸化，对腐败及致病微生物的生长起到抑制作用[6]，还可快速降解发酵过程中产生的亚硝酸盐，增强泡菜食用的安全性[7]。作为益生菌，乳酸菌具有调节肠道菌群、降低胆固醇、降低血压等优点[8-10]。此外，乳酸菌还可以通过降解大分子物质来提升发酵泡菜的风味[11-12]。发酵工艺对泡菜的工业化生产也有重要影响，不仅可以缩短泡菜的发酵周期，提高泡菜品质和经济效益[13]，还能增强泡菜的独特风味[14]。通过工艺优化，有助于接种菌株的生长发育，使其作用最大化[15]。

作者对泡菜中的乳酸菌进行了分离筛选与鉴定，同时优化了发酵泡菜的生产工艺。利用筛选出的具有优良发酵性能的菌株对新鲜芥菜进行发酵，分析了发酵过程中各指标的变化情况，为工业化泡菜的生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

泡菜：市售（广西壮族自治区钦州市亿天食品有限公司、广东省云浮市新兴县云翰食品有限公司）及自制；新鲜芥菜、黑豆粉、绿豆粉、食盐、葡萄糖、番茄：市售；复合氨基酸：山东冠赢生物科技有限公司；花生蛋白：安阳天祥瑞食品科技有限公司；大豆分离蛋白：临沂山松生物制品有限公司；鳕鱼胶原蛋白肽：海南华研胶原科技股份有限公司；玉米浆干粉：北京鸿润宝顺科技有限公司；细菌 DNA 提取试剂盒、琼脂糖：生工生物工程（上海）股份有限公司；其他试剂：国药集团化学试剂有限公司。

MRS 培养基：胰蛋白胨 10.00 g、酵母提取物 5.00 g、牛肉浸膏 10.00 g、葡萄糖 20.00 g、吐温-80 1 mL、无水乙酸钠 5.00 g、磷酸氢二钾 2.00 g、柠檬酸三铵 2.00 g、七水硫酸镁 0.58 g、四水硫酸锰 0.25 g、去离子水 1 L、琼脂 20.00 g（固体培养基），pH 6.2~6.4，121 ℃灭菌 20 min。

1.2 仪器与设备

电子天平：AL204 型，梅特勒托利多科技（中国）有限公司；立式压力蒸汽灭菌器：BXM-110VE 型，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；超净工作台：SJ-CJ-2FD 型，苏州苏洁净化设备有限公司；恒温振荡摇床：ZQZY-98C 型，上海知楚仪器有限公司；超低温冷冻冰箱：DW-HL100 型，中科美菱低温科技股份有限公司；电热恒温鼓风干燥箱：DGG-9240B 型，上海森信实验仪器有限公司；pH 计：PHS-3C 型，上海佑科仪器仪表有限公司；酶标仪：SpectraMax190 型，英国 Molecular Devices 公司；凝胶成像系统：Tanon-1600 型，上海天能生命科学有限公司；物性测试仪：TA-XT Plus 型，英国 Stable Micro System 公司。

1.3 研究方法

1.3.1 菌株的分离与纯化

将体积分数为 10% 的泡菜母水添加到 MRS 液体培养基中，37 ℃下孵育 24 h。用无菌生理盐水 10 倍梯度稀释 7 次，再各取 100 μL 稀释后的菌液均匀涂布于 MRS 固体平板（含有质量分数 2% 的 $CaCO_3$）上，37 ℃下培养 48 h。挑取在平板上产生透明溶钙圈的单菌落进行划线纯化，对纯化后的菌株进行革兰氏染色镜检和过氧化氢酶试验[16]，选取革兰氏阳性且过氧化氢酶阴性的菌株放入体积分数 20% 的甘油管中，−80 ℃保存。

1.3.2 发酵菌株的复筛

将筛选保存的菌株活化后以体积分数 5% 分别接种到 MRS 液体培养基和含有 125 μg/mL 亚硝酸钠的 MRS 液体培养基中，对照组添加等量无菌水，37 ℃培养箱中分别培养 24 h 和 72 h。用 pH 计测定各菌株的 pH，参照 GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的酸碱指示剂滴定法测定各菌株生产总酸的质量分数，来表征其产酸性能；参照 GB 5009.33—2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》中的分光光度法测定各培养基中的亚硝酸盐质量分数，计算各菌株亚硝酸盐降解率[17]。

1.3.3 菌株的 16S rDNA 鉴定

利用细菌 DNA 提取试剂盒提取各菌株基因组 DNA，用引物 27F（GCATATCAATAAGCGGAGGAAAAG）和 1492R（GGTCCGTGTTTCAAGACGG）

进行扩增，通过琼脂糖凝胶电泳检验扩增片段。将扩增产物送至生工生物工程（上海）股份有限公司进行测序，在NCBI网站上利用BLAST程序进行比对[18]。

1.3.4 食品级培养基的确定

添加7种不同成分（质量分数为2.5%的黑豆粉、绿豆粉、复合氨基酸、花生蛋白、大豆分离蛋白、鳕鱼胶原蛋白肽、玉米浆干粉）作为食品级培养基的氮源，再添加质量分数2.0%的食品级葡萄糖、质量分数1.0%的番茄汁、质量分数0.5%的食品级磷酸氢二钾配制食品级培养基，灭菌待用。以工业MRS培养基作为对照，将上步筛选出的菌株以体积分数5.0%的接种量接种到灭菌后的食品级培养基中，于37 ℃、200 r/min摇床培养24 h。然后将培养好的菌液稀释涂布到MRS平板上，37 ℃培养48 h，对平板上的单菌落进行计数。

1.3.5 发酵剂的制备

将甘油管中保存的植物乳杆菌6-1和短乳杆菌6-3于MRS固体培养基上活化3代，挑取单菌落置于筛选出的食品级培养基中，氮源为玉米浆干粉、花生蛋白和鳕鱼胶原蛋白肽，37 ℃下培养24 h，制得菌密度为1×10^{7}~1×10^{8} CFU/mL的发酵剂。

1.3.6 发酵泡菜的制备和取样

参考陈偲等[19]的方法制备发酵芥菜并加以改进，流程如下：芥菜的挑选、清洗和晾干→漂烫→泡菜坛杀菌→蔬菜入坛→接种发酵剂→密封发酵→成品。

在沸水中将发酵坛子煮5 min，烘箱烘干。分别添加质量分数3.0%的盐、质量分数2.0%的葡萄糖、质量分数1.0%的不同氮源至纯净水中，煮沸，冷却至室温备用。以1 g∶4 mL的料液比向坛子中添加蔬菜和准备好的料液，以体积分数7.5%的接种量接种到含有相同氮源的不同菌株发酵剂中，密封，于30 ℃下发酵；自然发酵组中不进行氮源的补充和发酵剂的接种，其余操作一致。每隔24 h取样一次测定相应指标。

1.3.7 发酵泡菜的指标测定

用pH计直接测定泡菜发酵过程中的pH，以表征泡菜的酸化情况。采用GB 5009.33—2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》中的分光光度法测定泡菜发酵过程中的亚硝酸盐质量分数。

参照文献[20]中的方法对泡菜的硬度、弹性和咀嚼性进行测定。取泡菜的梗茎部位进行测试，将其切成2 cm×1 cm×8 mm的长方体。采用TPA模式，P2探头，测定参数设置为测前速度1 mm/s、测中速度1 mm/s、测后速度10 mm/s，触发力5 g，每个样品测定9次。

参照文献[21]中的方法稍加修改，对发酵好的泡菜产品进行感官评定。邀请6名经过培训的食品专业同学参照感官评分标准（见表1）对各泡菜的色泽、质地、气味、滋味、总体接受度进行评分，感官评分采用9分制，取平均分作为最终评分。

1.4 数据处理

数据以平均值±标准差的形式表示。使用Origin 2024软件进行数据处理与绘图，利用SPSS 17.0软件进行数据的显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 泡菜母水中菌株的初筛

从市售及自制泡菜中共筛选出了8株革兰氏阳性和过氧化氢酶阴性的菌株，推测其可能是乳酸菌[22-23]，菌株的菌落形态和初筛情况见表2。

表1 泡菜感官评价标准表

Table 1 Standard of sensory evaluation of pickles

分值	感官指标				总体接受度
	色泽	质地	气味	滋味	
8~9分	菜心嫩黄色、光泽鲜亮	清脆、有韧性	有蔬菜的清香、有发酵的醇香、酸味适中、无异味	酸咸味适宜、无苦涩味、总体滋味较好	好
3~7分	颜色略暗、稍有褐变、光泽不明显	较脆爽、韧性较低	清香味较弱、醇香味较弱、酸味过重或过淡、有稍弱腐臭味	酸咸味较重或较淡、不太适宜、有较弱苦涩味、总体滋味一般	一般
0~2分	颜色偏深褐色、色泽较暗、无光泽	不脆、无韧性	无清香味、无醇香味、有严重腐臭味	酸咸味过重或过淡、苦涩味严重、总体滋味较差	差

表 2　泡菜中初筛菌株的菌落形态和初筛情况

Table 2　Colony morphology and preliminary screening status of strains from pickles

菌株名称	菌落形态	有无溶钙圈产生	过氧化氢酶试验	镜检结果
2-1	白色、菌落大小 0.3~1.4 mm、圆形、凸起、边缘整齐、表面光滑	有	阴性	革兰氏阳性、短杆状
2-2	白色、菌落大小 0.1~1.3 mm、圆形、凸起、边缘整齐、表面光滑	有	阴性	革兰氏阳性、短杆状
2-3	乳白色、菌落大小 0.3~1.1 mm、圆形、隆起、边缘整齐、表面光滑	无	阴性	革兰氏阳性、细短杆状
2-4	乳白色、菌落大小 0.2~1.3 mm、圆形、隆起、边缘整齐、表面光滑	无	阴性	革兰氏阳性、细长杆状
2-5	白色、菌落大小 0.1~1.2 mm、圆形、凸起、边缘整齐、表面光滑	有	阴性	革兰氏阳性、短杆状
6-1	白色、菌落大小 0.2~1.2 mm、圆形、凸起、边缘整齐、表面光滑	有	阴性	革兰氏阳性、短杆状
6-2	白色、菌落大小 0.1~1.4 mm、圆形、凸起、边缘整齐、表面光滑	有	阴性	革兰氏阳性、短杆状
6-3	乳白色、菌落大小 0.2~1.1 mm、圆形、隆起、边缘整齐、表面光滑	有	阴性	革兰氏阳性、细短杆状

2.2　乳酸菌的复筛及鉴定

利用各菌株的产酸和降解亚硝酸盐性能对初筛得到的 8 种菌株进一步复筛，各菌株的产酸量和 pH 结果见图 1(a)。可以看出，各菌株的 pH 和产酸量之间呈负相关，其产酸能力之间存在差异，其中 6-1 菌株产酸能力最强，在培养 24 h 后，其产酸量为 8.33 g/kg，pH 下降至 4.0。亚硝酸盐是泡菜中最常见的致癌物，过量摄入对人体有害，通过筛选出具有较高亚硝酸盐降解能力的菌株，可以在很大程度上降低泡菜中的亚硝酸盐质量分数，提升其食用安全性[24]。各菌株对亚硝酸盐的降解能力见图 1(b)。6-3 菌株对亚硝酸盐的降解率(92%)最高，2-1 和 6-1 菌株对亚硝酸盐的降解率也达到 90% 以上，说明利用这几种菌株对泡菜进行接种发酵能显著降解泡菜中的亚硝酸盐，提高食用安全性。

通过对筛选得到的 8 种菌株进行 16S rDNA 扩增，然后用琼脂糖凝胶电泳检验扩增片段，各菌株在 1 500 bp 处均有一条明亮的条带，证明 PCR 扩增成功，见图 1(c)。将测序结果在 NCBI 网站上进行 BLAST 比对，各菌株的鉴定结果见表 3，共鉴定出了 5 株植物乳杆菌和 3 株短乳杆菌，二者皆为发酵泡菜中的优势菌株。综上所述，选择植物乳杆菌 6-1 和短乳杆菌 6-3 用于后期发酵。

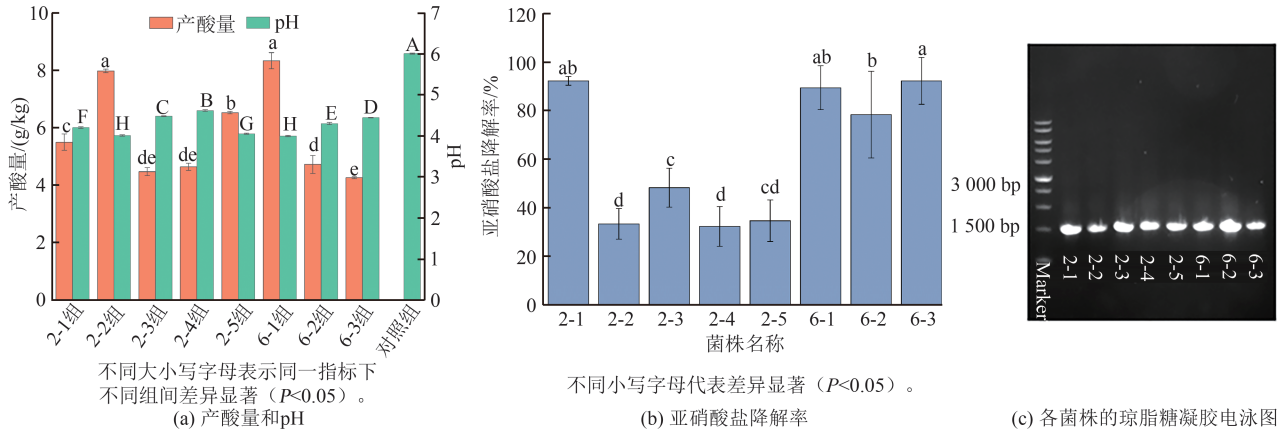


图 1　不同菌株的复筛情况

Fig. 1　Rescreening results of different strains

2.3　食品级培养基的确定

MRS 培养基是工业上最常用于培养乳酸菌的培养基，但在其中培养的菌株不能直接用于食品发酵，需要经过离心、重悬等处理。考虑到发酵泡菜的工业化生产和发酵工艺的简化，开发了可用于乳酸菌生长发育的食品级培养基，培养的菌株可直接投入发酵体系[25]。以工业 MRS 培养基作为对照，选择 7 种氮源作为食品级培养基的氮源，添加碳源、生长因子和缓冲盐，研究植物乳杆菌 6-1 和短乳杆菌 6-3 在各培养基中的生长情况，见

表3 各菌株的分子生物学鉴定结果

Table 3 Results of molecular biology identification of the strains

菌株名称	描述	相似度/%	覆盖率/%
2-1	*Lactobacillus plantarum* strain 7014	99.04	98
2-2	*Lactobacillus plantarum* strain 6017	99.46	99
2-3	*Levilactobacillus brevis* strain LAB-3	99.18	98
2-4	*Lactobacillus brevis* strain Lbr-42	99.39	99
2-5	*Lactobacillus plantarum* strain 1855	99.52	98
6-1	*Lactobacillus plantarum* strain 3356	99.46	98
6-2	*Lactiplantibacillus plantarum* strain HBSD 009	99.73	99
6-3	*Lactobacillus brevis* strain 6524	99.79	98

表4。2株乳酸菌在含3种氮源（玉米浆干粉、花生蛋白、鳕鱼胶原蛋白肽）的食品级培养基中的生长情况较好，且植物乳杆菌6-1的生长情况优于短乳杆菌6-3，因此在后续研究中将这3种氮源作为食品级培养基中的氮源。

2.4 泡菜发酵过程中pH和亚硝酸盐质量分数的变化

泡菜发酵过程中pH的变化对于泡菜的成熟和品质控制至关重要，pH迅速降低可以加快发酵进程，抑制发酵体系中腐败和致病微生物的生长[26]。由图2（a）~（b）可知，在泡菜发酵过程中，自然发酵组在发酵第1天后pH变化趋于平缓，而接种发酵组在发酵过程中持续降低，说明乳酸菌的接种可以更加充分利用发酵体系中的糖类物质，使发酵环境迅速酸化，加快发酵进程[27]。添加不同氮源对发酵体系也有不同的影响，玉米浆干粉的添加会使发酵体系迅速过度酸化，使泡菜风味恶化，难以被消费者接受，降低了泡菜品质。利用花生蛋白作为食品培养基的氮源，且在发酵体系中额外进行补充，使发酵芥菜的pH降低最快。在发酵第4天时，植物乳杆菌6-1和短乳杆菌6-3发酵芥菜的pH均降至3.65。一般来说，当泡菜的pH降至4.00以下时，可以认为此时泡菜已经成熟[28]，因此证实利用花生蛋白作为食品级培养基的氮源，且将其作为额外的氮源补充到发酵体系中可以加速发酵进程[29]。

泡菜中亚硝酸盐质量分数过高会降低其食用安全性，从而限制其工业化生产。泡菜发酵过程中亚硝酸盐质量分数的变化情况见图2（c）~（d）。随着发酵时间的增加，添加花生蛋白发酵组泡菜的亚硝酸盐质量分数一直保持较低水平；而添加鳕鱼胶原蛋白肽发酵组泡菜的亚硝酸盐质量分数先上升后下降；由于自然发酵组无菌株接种，导致其亚硝酸盐质量分数在发酵过程中存在波动，且在发酵第4天时，其亚硝酸盐质量分数仍在200 mg/kg以上，远远高于GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的20 mg/kg。而接种发酵组在发酵第3天已经无法检测到亚硝酸盐的存在，2种乳酸菌之间不存在差异，均可以显著降低发酵泡菜的亚硝酸盐质量分数。在发酵过程中，由于乳酸菌的迅速增殖，它们成为抑制硝酸盐还原微生物生长的优势细菌，从而显著降解泡菜中的亚硝酸盐。有研究证实，乳酸菌可能通过抑制泡菜中N-亚硝基二甲胺前体的形成而间接降低泡菜中的N-亚硝基二甲胺，从而提高亚硝酸盐清除能力[7]。因此通过乳酸菌的接种和发酵体系中氮源的添加（尤其是添加花生蛋白），不仅可以加快泡菜的发酵进程，还可以提升其食用安全性。

表4 2种菌株在不同氮源的食品级培养基中的活菌浓度

Table 4 Concentration of viable bacteria of the two strains in food grade media with different nitrogen sources

培养基类型	培养基氮源	植物乳杆菌6-1活菌浓度/（$\times10^7$ CFU/mL）	短乳杆菌6-3活菌浓度/（$\times10^7$ CFU/mL）
自制食品级培养基	黑豆粉	1	0
	绿豆粉	4	3
	复合氨基酸	0	0
	花生蛋白	52	45
	大豆分离蛋白	11	9
	鳕鱼胶原蛋白肽	30	27
	玉米浆干粉	95	76
工业MRS培养基	胰蛋白胨	135	103

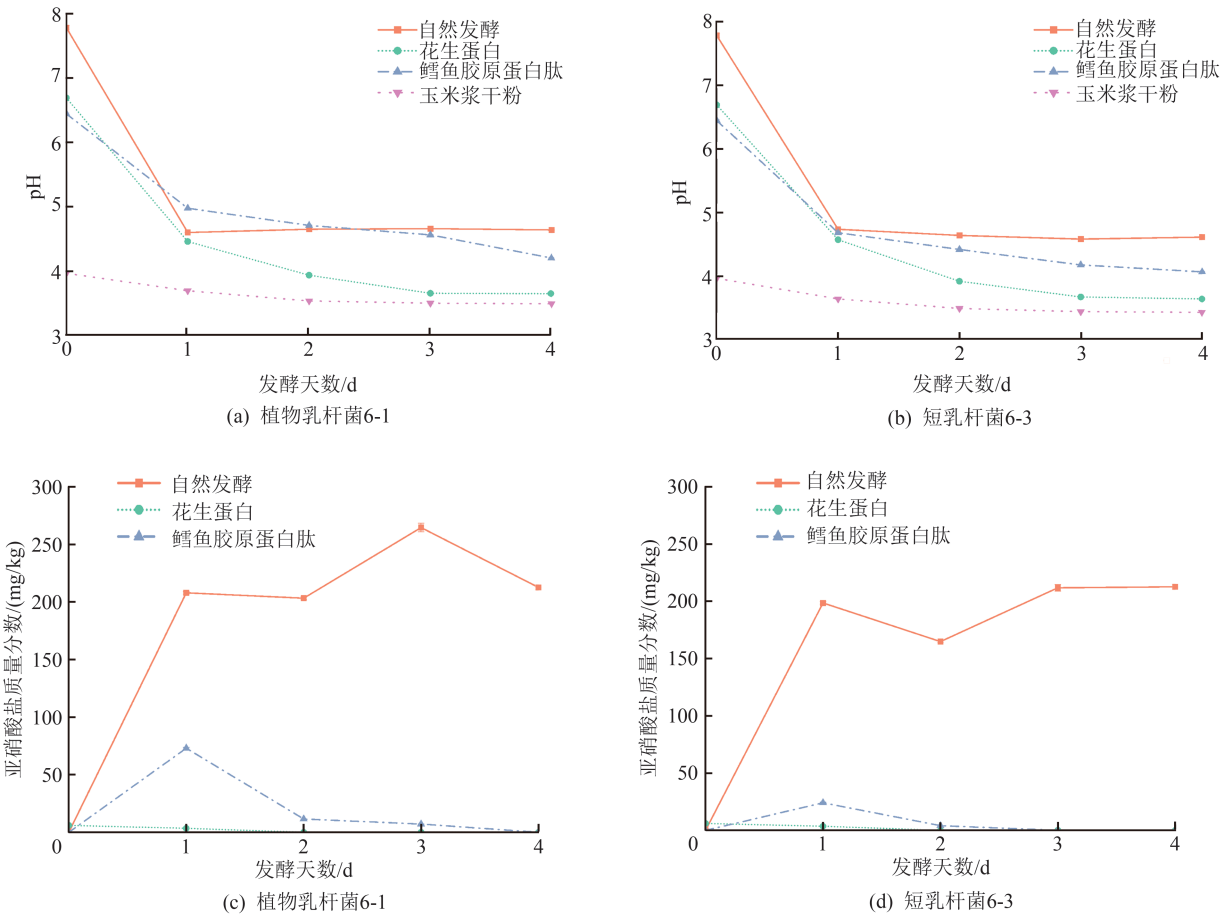


图 2 不同乳酸菌在添加不同氮源的发酵泡菜中 pH 和亚硝酸盐质量分数的变化情况

Fig. 2 Changes in pH and nitrite mass fraction of fermented pickles by different lactic acid bacteria with different nitrogen sources

2.5 泡菜发酵过程中质构特性的变化

泡菜爽脆的口感是其深受消费者喜爱的原因之一。果胶、纤维素、半纤维素和少量蛋白质是蔬菜细胞细胞壁的主要组成物质，果胶的分解是导致泡菜脆度下降的主要因素[30]。常用硬度、弹性、咀嚼性 3 个指标来评价泡菜的质构特性[31]，不同发酵方式的泡菜质构特性见表 5。与自然发酵组相比，接种发酵组泡菜的硬度、弹性和咀嚼性均有所增加。与自然发酵组相比，利用鳕鱼胶原蛋白肽作为氮源接种短乳杆菌和利用花生蛋白作为氮源接种植物乳杆菌的发酵泡菜是各项质构指标最好的 2 组泡菜，其质构特性具有显著差异，硬度、弹性和咀嚼性均得到了显著提高，极大程度上提升了泡菜的口感。这可能是菌株接种影响了泡菜中

表 5 不同发酵方式的泡菜质构特性

Table 5 Textural properties of pickles fermented by different fermentation methods

接种菌株	添加氮源	硬度/N	弹性	咀嚼性
无	无	381.029±12.607^{d}	0.136±0.006^{e}	0.610±0.092^{c}
植物乳杆菌	花生蛋白	1 167.987±109.399^{a}	0.444±0.016^{b}	104.865±1.223^{b}
	鳕鱼胶原蛋白肽	851.277±54.436^{b}	0.367±0.030^{c}	16.056±5.586^{c}
	玉米浆干粉	337.079±17.773^{d}	0.240±0.013^{d}	1.518±0.142^{c}
短乳杆菌	花生蛋白	685.003±104.617^{c}	0.418±0.033^{b}	7.938±1.822^{c}
	鳕鱼胶原蛋白肽	1 128.603±188.189^{a}	0.565±0.048^{a}	157.959±26.728^{a}
	玉米浆干粉	669.128±28.055^{c}	0.442±0.007^{b}	4.538±0.972^{c}

注：同一列的不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

果胶酶和果胶纤维素酶的活性，且微生物在生长过程中也会产生不同的酶类，从而影响泡菜的质构特性[32]。

2.6　泡菜的感官评价

不同发酵方式下芥菜的感官评价结果见图3。从色泽上来看，各组发酵芥菜无明显差异，其余各指标存在显著差异。添加玉米浆干粉作为氮源，使泡菜的气味和滋味严重恶化，导致其总体接受度最低，因此，该氮源不能用于泡菜发酵。利用植物乳杆菌发酵并添加花生蛋白组的泡菜在气味、滋味和总体接受度得分高于其余各组，说明利用此方法发酵得到的泡菜产品更受消费者喜爱，有一定的市场前景。

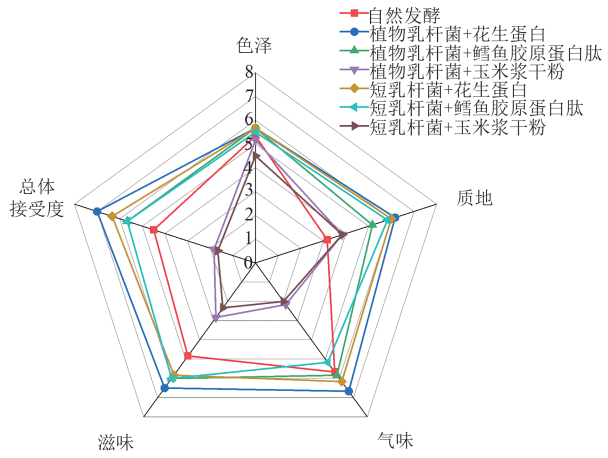


图3　泡菜感官评价得分

Fig. 3　Sensory evaluation score of fermented mustards

3　结论

从市售及自制泡菜中共筛选得到了8种乳酸菌，通过菌株的产酸能力和降解亚硝酸盐性能进行复筛，结合16S rDNA测序，得到植物乳杆菌6-1和短乳杆菌6-3用于泡菜发酵。开发了适宜乳酸菌生长的含不同氮源的食品级培养基，发现植物乳杆菌6-1和短乳杆菌6-3在玉米浆干粉、花生蛋白、鳕鱼胶原蛋白肽3种氮源的食品级培养基中的生长情况较好。优化了发酵泡菜的制备工艺，发现额外补加质量分数1.0%的花生蛋白、接种体积分数7.5%的植物乳杆菌6-1发酵剂，可以在发酵第4天使pH降至3.65，且亚硝酸盐未检出，泡菜的硬度、弹性和咀嚼性得到了显著提升，各项感官指标得分较高，深受消费者喜爱。该研究为泡菜的快速稳定工业化生产提供了依据。

参考文献

[1] TIAN Y，DENG F M，ZHAO L Y，et al. Characterization of extractable components of fresh and fermented Huarong large-leaf mustard and their inhibitory effects on human colon cancer cells[J]. Food Bioscience，2021，43：101280.

[2] 任亭，刘玉凌，彭玉梅，等. 传统泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及其在麻竹笋泡菜中的应用[J]. 食品科技，2021，46（8）：33-37，45.
REN T，LIU Y L，PENG Y M，et al. Screening and identification of lactic acid bacteria from traditional pickle and its application in *Dendrocalamus latiflorus* pickle[J]. Food Science and Technology，2021，46（8）：33-37，45.

[3] JIANG L J，CAO Y，DENG Z Y，et al. Evaluation and comparison of physicochemical properties，volatile substances，and microbial communities of leaf mustard（*Brassica juncea* var. *multiceps*）under natural and inoculated fermentation [J]. Journal of Food Science，2023，88（8）：3255-3273.

[4] 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.

[5] 刘玉凌，任亭，彭玉梅，等. 老盐水中乳酸菌的筛选鉴定及其在青菜头泡菜中的应用[J]. 食品与发酵工业，2020，46（2）：208-213.
LIU Y L，REN T，PENG Y M，et al. Screening and identification of lactic acid bacteria from old brine and its application in tumor stem mustard pickles[J]. Food and Fermentation Industries，2020，46（2）：208-213.

[6] CHEN C X，CHENG G G，LIU Y P，et al. Correlation between microorganisms and flavor of Chinese fermented sour bamboo shoot：roles of *Lactococcus* and *Lactobacillus* in flavor formation[J]. Food Bioscience，2022，50：101994.

[7] ZHANG X Z，HAN J R，ZHENG X G，et al. Use of *Lactiplantibacillus plantarum* ZJ316 as a starter culture for nitrite degradation，foodborne pathogens inhibition and microbial community modulation in pickled mustard fermentation[J]. Food Chemistry，2022，14：100344.

[8] GUO S J，LI C C，FENG Y T，et al. Differences among *Lactiplantibacillus plantarum* strains isolated from different fermented foods in their potential cholesterol-lowering properties[J]. Food Bioscience，2024，59：103847.

[9] YANG S，ZHU Q，YE X Q，et al. Identification of the

characteristic chemical constituents in fermented *Toona sinensis* buds and exploration of their hypoglycemic efficacy by widely targeted metabolomics [J]. Food Bioscience,2024,57:103609.

[10] 冯金晓,李明珠,李翠萍,等. 传统泡菜中两株耐酸性乳酸菌的分离与鉴定[J]. 食品与机械,2021,37(5):22-26.
FENG J X, LI M Z, LI C P, et al. Isolation and identification of two acid resistant lactic acid bacteria from traditional pickles[J]. Food & Machinery,2021,37(5):22-26.

[11] 史巧,刘毕琴,汤回花,等. 发酵蔬菜菌种应用及菌群调控研究进展[J]. 食品与发酵工业,2021,47(5):273-281.
SHI Q,LIU B Q,TANG H H,et al. Research progress on the application of starter strains and the regulation of microflora in vegetable fermentation [J]. Food and Fermentation Industries,2021,47(5):273-281.

[12] 侯小艺,王建辉,邓娜,等. 乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展[J]. 食品与机械,2023,39(4):232-240.
HOU X Y, WANG J H, DENG N, et al. Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of fermented vegetables[J]. Food & Machinery,2023,39(4):232-240.

[13] 胡丹丹,陈山乔,孙志栋,等. 腌制叶用芥菜发酵菌应用与发酵工艺优化[J]. 现代食品科技,2024,40(3):131-141.
HU D D, CHEN S Q, SUN Z D, et al. Application of fermentation bacteria and optimization of fermentation technology for pickled leaf mustard[J]. Modern Food Science and Technology,2024,40(3):131-141.

[14] 王玉玮,袁亚宏,岳田利. 雪莲菌发酵豇豆工艺优化及其挥发性风味成分分析[J]. 食品与机械,2021,37(5):176-182,232.
WANG Y W, YUAN Y H, YUE T L. Process optimization of fermented cowpea by kefir grains and analysis of volatile flavor components [J]. Food & Machinery,2021,37(5):176-182,232.

[15] HE Z,CHEN H Y,WANG X Y,et al. Effects of different temperatures on bacterial diversity and volatile flavor compounds during the fermentation of Suancai, a traditional fermented vegetable food from Northeastern China [J]. LWT-Food Science and Technology,2020,118:108773.

[16] 覃志成,周笑犁,吴承木,等. 番茄发酵液中乳酸杆菌的分离鉴定及对模拟胃肠液耐受性研究[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(8):54-61.
QIN Z C, ZHOU X L, WU C M, et al. Isolation and identification of *Lactobacillus* in tomato fermentation broth and investigation of its tolerance to simulated gastrointestinal environment[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(8):54-61.

[17] 赵玉娟,刘才子,高岩松,等. 东北酸菜发酵乳酸菌的筛选及评价[J]. 现代食品科技,2024,40(3):121-130.
ZHAO Y J, LIU C Z, GAO Y S, et al. Screening and evaluation of lactic acid bacteria for Dongbei Suancai fermentation[J]. Modern Food Science and Technology,2024,40(3):121-130.

[18] 孙熙洽,崔承弼,齐仕博,等. 低盐泡菜中耐酸性乳酸菌的筛选、鉴定及特性研究[J]. 食品与机械,2022,38(1):24-31,37.
SUN X H, CUI C B, QI S B, et al. Screening, identification and characteristics of acid-tolerant lactic acid bacteria in low-salt pickles[J]. Food & Machinery,2022,38(1):24-31,37.

[19] 陈偲,张明,付竹贤,等. 乳酸菌与酵母菌的复配筛选及在传统泡菜中应用[J]. 食品工业科技,2023,44(16):155-163.
CHEN C, ZHANG M, FU Z X, et al. Screening A combination of lactic acid bacteria and yeast and application in traditional pickle [J]. Science and Technology of Food Industry,2023,44(16):155-163.

[20] 薛寒. 低亚硝酸盐泡菜生产工艺与品质变化研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2023.

[21] 孟繁博,黄道梅,郑秀艳. 不同品种芥菜发酵酸菜的品质分析[J]. 中国调味品,2021,46(12):155-158.
MENG F B,HUANG D M,ZHENG X Y. Quality analysis of fermented mustards with different varieties[J]. China Condiment,2021,46(12):155-158.

[22] 王一淇. 芥菜发酵过程中菌相变化规律及发酵剂的研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.

[23] 阿丽亚•阿达力,梅时勇,张冀芳,等. 优势乳酸发酵菌株筛选、鉴定及对发酵萝卜风味品质的影响[J]. 食品与机械,2024,40(6):53-61.
ADALIALIYA,MEI S Y,ZHANG J F,et al. Screening of dominant lactic acid fermentation strains, identification and effect on flavor quality of fermented radish[J]. Food & Machinery,2024,40(6):53-61.

[24] 熊蝶,袁岚玉,李媛媛,等. 陕西泡菜中降解亚硝酸盐乳酸菌的筛选及其发酵特性与耐受性研究[J]. 食品与发酵工业,2021,47(6):139-144.
XIONG D, YUAN L Y, LI Y Y, et al. Screening, fermentation characteristics and tolerance of nitrite-degrading lactic acid bacteria in Shaanxi Paocai [J]. Food and Fermentation Industries,2021,47(6):139-144.

[25] 陈曼曼,吴兴壮. 传统发酵蔬菜中耐乙醇型乳酸菌的研究进展[J]. 中国酿造,2023,42(1):9-14.

(下转第 172 页)