苏莉娅, 杨梓垚, 陈诗宇, 等. 适用于肉制品发酵的乳酸菌的筛选与性能评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 204−214. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070114
SU Liya, YANG Ziyao, CHEN Shiyu, et al. Screening and Evaluation of Lactic Acid Bacteria Suitable for the Production of Fermented Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 204−214. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070114

· 生物工程 ·

适用于肉制品发酵的乳酸菌的筛选与性能评价

苏莉娅[1], 杨梓垚[2], 陈诗宇[1], 杨树婷[1], 段友琴[1], 付　雨[1], 陈　娟[1,*]
（1.西南民族大学药学与食品学院, 四川成都 610225;
2.铜仁市农业农村局, 贵州铜仁 554300）

摘　要: 本研究从传统发酵食品中分离鉴定优势乳酸菌，评价分离菌株的发酵性能和安全性，进一步以猪肉汤为基质对优良乳酸菌发酵产生的挥发性风味物质进行分析。结果表明，从 30 份发酵肉制品和 10 份浆水样品中共分离鉴定出 10 种、20 株乳酸菌，根据肉制品发酵剂筛选标准，得到产酶性能、产酸能力、耐受性能等各项性能优异且安全的植物乳杆菌 L77、乳酸肠球菌 L2、肠膜明串珠菌 L66、清酒乳杆菌 L111 和粪肠球菌 L98。将 L77、L2 分别与木糖葡萄球菌 S120 单独和复配发酵猪肉汤，发现 L77 组和 L77-S120 组无论是主体风味化合物（ROAV≥0.1）的数量还是含量均高于其余组别，而且呈油脂香和奶香的化合物数量和含量也更高。可见，L77 单独发酵或 L77-S120 复配发酵不仅能够增加挥发性风味物质的数量和含量，还能够使典型风味更加突出，有望作为肉制品的潜在功能发酵剂。

关键词: 乳酸菌, 发酵性能, 安全性能, 挥发性风味物质, 肉品发酵剂
中图分类号: S872　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0204−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070114
本文网刊:

Screening and Evaluation of Lactic Acid Bacteria Suitable for the Production of Fermented Meat Products

SU Liya[1], YANG Ziyao[2], CHEN Shiyu[1], YANG Shuting[1], DUAN Youqin[1], FU Yu[1], CHEN Juan[1,*]
（1.College of Pharmacy and Food, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China;
2.Tongren Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Tongren 554300, China）

Abstract: The predominant lactic acid bacteria were isolated and identified from some traditional fermented foods, and fermentation performances and safety properties of the isolated strains were evaluated, then the production of volatile flavor compounds from pork broth fermented with excellent strains was further analyzed in this study. A total of 10 species, 20 strains of lactic acid bacteria were isolated and identified from 30 portions of fermented meat products and 10 portions of Jiangshui. Four strains of lactic acid bacteria were screened out according to the screening criteria of starter culture for fermented meat product, including *Lactiplantibacillus plantarum* L77, *Enterococcus lactis* L2, *Leuconostoc mesenteroides* L66, *Lactilactobacillus sakei* L111 and *Enterococcus faecalis* L98. After that, L77 and L2 were fermented individually and simultaneously with *Staphylococcus xylosus* S120 in pork broth, respectively. The number and content of main flavor compounds (ROAV≥0.1) in L77 group and L77-S120 group were higher than those in other groups. Furthermore, the number and content of aroma compounds generating lipid aroma and milky aroma in L77 group and L77-S120 group were also higher than those in other groups. These results indicated that L77 or L77-S120 fermentation not only increased the amounts of volatile flavor compounds, but also strengthened lipid aroma and milky aroma which were typic characteristics for fermented meat.

收稿日期: 2025−07−10
基金项目: 四川省自然科学基金面上项目（2025ZNSFSC0226）; 2025 年中央高校基本科研业务费专项资金研究类项目（ZYN2025115）。
作者简介: 苏莉娅（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 13321365557@163.com。
*** 通信作者:** 陈娟（1980−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品微生物与食品安全, E-mail: chenj1221@126.com。

Therefore, L77 and in combination with S120 could be used as functional starter cultures for the production of fermented meat products.

Key words: lactic acid bacteria; fermentation performance; safety property; volatile flavor compounds; starter culture for fermented meat products

乳酸菌是指能以碳水化合物为原料产生大量乳酸的一类兼性厌氧型细菌的总称[1]，常存在于各种发酵食品中，如发酵肉制品、泡菜、酸乳、海产品、发酵蔬菜水果等[2−3]，具有调节肠道菌群、增强免疫力、降低胆固醇等健康功效[4]。乳酸菌是从发酵肉制品中最早被分离出来的微生物之一[5]。传统发酵肉制品存在发酵周期长、产品品质不稳定及潜在安全风险高等问题。将乳酸菌作为发酵剂应用于发酵肉类产品，不仅能够有效控制腐败菌和致病菌的增殖[6]，提高产品的感官品质和安全性，延长保质期[7−9]，还能够产生乳酸[10]，降解肉中的蛋白质，改善肉制品的质地和口感，促进消化吸收[11]，赋予发酵肉制品特有的色泽和风味，同时能够减少生物胺和亚硝酸盐的含量。目前，植物乳杆菌、清酒乳杆菌、弯曲乳杆菌等是被广泛应用于肉制品发酵的乳酸菌菌种[12−13]。

国内外对于乳酸菌的研究多集中在其发酵、产酸等性能上，当乳酸菌作为发酵剂使用时，这些性能有助于发酵肉制品风味的改善，赋予肉制品独特的香气特征。米瑞芳等[14] 研究发现，乳酸杆菌和魏斯氏菌有助于促进酸肉中挥发性风味物质如醇类、酯类和酸类的生成，从而改善其风味品质。Jiang 等[15] 研究发现，接种乳酸片球菌和米根霉菌的发酵羊肉香肠中醛类和酯类风味物质含量均有所增加。Li 等[16] 分别接种植物乳杆菌 H30-2 和乳酸片球菌 H30-21 到发酵鱼糜中，发现接种植物乳杆菌 H30-2 能够促进戊醇、辛醇和壬醇等风味物质的产生，乳酸片球菌 H30-211 有利于醛类物质的产生。Zheng 等[17] 研究了接种植物乳杆菌 YR07、清酒乳杆菌 L.48 对发酵香肠风味的影响，发现清酒乳杆菌 L.48 能促进 3-羟基-2-丁酮、己醛和 1-辛烯-3-醇等特征风味质的生成。可见，目前大多数研究集中在乳酸菌改善发酵肉制品的整体风味特征，使整体香气更加丰富、浓郁上。然而，缺乏针对性地筛选高产发酵肉制品典型风味油脂香和奶油香的乳酸菌及其应用的研究报道。

本研究从发酵肉制品和浆水中分离乳酸菌，分析分离菌株的产酶性能、耐受性能、产酸能力和安全性等各项肉制品发酵剂性能指标，筛选安全且性能优良的菌株，将筛选出的乳酸菌单独接种和与葡萄球菌复配接种发酵猪肉汤，测定产生的挥发性风味物质，从而得出产香性能优异，能够增加发酵肉制品典型风味油脂香和奶油香的发酵组合，为肉制品功能发酵剂的开发提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

发酵食品 40 份　其中 12 份干发酵猪肉香肠、5 份干腌猪肉、5 份干腌猪排、2 份干腌鸭肉、6 份烟熏猪肉采集于四川、贵州、安徽，10 份浆水采集于甘肃省天水市（家庭手工制作的浆水）；猪肉　四川省成都市武侯区洗面桥巷菜市场；伊利高蛋白脱脂奶粉市售；金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）ATCC 43300、肠出血性大肠埃希氏菌 O157:H7（*Escherichia coli* O157:H7）CICC 21530　中国工业微生物菌种保藏管理中心；木糖葡萄球菌 S120、表皮葡萄球菌 S125　保藏于西南民族大学药学与食品学院微生物菌种保藏中心；1 mol/L Tris-HCl（pH8.0）、0.5 mol/L EDTA（pH8.0）、TE 缓冲液、50×TAE（电泳缓冲液）、1% 琼脂糖凝胶、双蒸水（ddH_2O）、Taq PCR Master Mix（2X, blue dye）、DNA Marker D（100~2000 bp）、TS-GelRed 核酸凝胶染料（10000× 水溶液）、16S rRNA 通用引物　生工生物工程（上海）股份有限公司；丙酮、盐酸、亚硝酸钠、明胶　成都市科龙化工厂；环己酮　成都化夏化学试剂有限公司；三丁酸甘油酯琼脂基础　北京索莱宝科技有限公司；三丁酸甘油酯、聚乙烯醇、硝酸盐还原酶试剂盒、直接蓝 71　上海源叶生物科技有限公司；牛肉粉、蛋白胨　赛默飞世尔科技公司；葡萄糖　福晨（天津）化学试剂有限公司；无菌脱纤维羊血　平睿生物科技（北京）有限公司；对二甲氨基苯甲醛　天津大茂化学试剂厂；乙醚　四川西陇科学有限公司；冻干兔血浆　青岛海博生物科技有限公司；抗生素　杭州微生物有限公司；无菌棉棒　稳健医疗有限公司 MRS 琼脂培养基（MRS Agar, MRSA）、MRSB 肉汤培养基（MRS Broth, MRSB）、甘露醇氯化钠琼脂培养基（Mannitol Salt Agar, MSA）、胰蛋白胨大豆肉汤培养基（Trypticase Soy Broth, TSB）、缓冲蛋白胨水（Buffered Peptone Water, BPW）、平板计数琼脂培养基（Plate Count Agar, PCA）　青岛海博生物技术有限公司。

MLS-3030CH 高温高压灭菌锅　日本三洋电器股份有限公司；ZWY-240 恒温培养振荡器　上海智城分析仪器制造有限公司；HH-6 数显恒温水浴锅　国华（常州）仪器制造有限公司；AL204 分析天平　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；TC-96/G/H(b)C 基因扩增仪　杭州博日科技有限公司；DHP-9162D 电热恒温培养箱　上海齐欣科学仪器有限公司；UV1810S 紫外可见分光光度计　上海佑科仪器仪表有限公司；pH-4C$^+$酸度计　成都世纪方舟科技有限公司；LDO-9240A 电热恒温鼓风干燥箱　上海龙跃仪器设备有限公司；Trace DSQ 型气相色谱-质谱（Gas Chromatography Mass Spectrometer,

GC-MS)联用仪(配置 Triplus 自动进样器) 美国 Thermo公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳酸菌的分离与鉴定 取 10 g 样品加入 90 mL 缓冲蛋白胨水中, 37 ℃, 150 r/min 培养 1 h, 取上清液依次梯度稀释至 10^{-3}。吸取 10^{-1}、10^{-2}、10^{-3} 三个梯度的样液进行 MRSA 培养基涂布, 37 ℃ 培养 48 h。根据胡此海等[18] 的方法, 观察菌落的大小、形状、颜色、是否凸起等特征, 进行形态学观察鉴定, 初步认定为疑似乳酸菌。挑取做好标记的单个菌落划线于 MRSA 培养基上进行纯化, 挑取纯菌落, 编号后接种于 MRSB 培养基, 37 ℃, 150 r/min 培养 48 h, 以菌液∶70% 甘油=1∶1 混合, −80 ℃ 保存, 备用。

参考 Chen 等[19] 的方法, 并稍作修改。PCR 反应条件: 95 ℃ 预变性 5 min, 95 ℃ 变性 40 s, 55 ℃ 退火 50 s, 72 ℃ 延伸 40 s, 35 个循环, 最后 72 ℃ 保持 10 min, PCR 产物 4 ℃ 保存。将 PCR 扩增产物送至北京擎科生物科技有限公司进行双向测序, 将得到的拼接序列输入 NCBI 的 GenBank 数据库中, 采用 BLAST 程序进行同源性比对分析[20]。选取同源性大于 98% 的模式菌株的 16S rRNA 基因序列, 使用 MEGA 7.0 软件构建系统发育树, 最终进行菌种鉴定。

1.2.2 菌株的活化 将−80 ℃ 保存的乳酸菌菌株取出于室温解冻, 以 2% 的接种量接种至 MRSB 培养基中, 37 ℃, 150 r/min 振荡培养 24~48 h。划线至 MRSA 培养基上, 培养出单菌落, 备用。

1.2.3 发酵剂发酵性能评价实验

1.2.3.1 产硝酸盐还原酶、蛋白酶和脂肪酶实验 参照 Chen 等[19] 的方法, 配制产硝酸盐还原酶、蛋白酶和脂肪酶培养基。

硝酸盐还原酶实验: 挑取乳酸菌单菌落接种于硝酸盐培养基, 37 ℃ 培养 24~48 h。吸取 100 μL 菌液加入六孔白瓷反应板中, 滴加 100 μL 硝酸盐还原试剂, 观察实验结果, 直接变红为阳性, 否则为阴性。若实验呈阴性反应, 在白瓷板上加入少许锌粉, 立即观察实验结果, 若出现红色即鉴定为假阳性(阴性), 若依旧不变色则鉴定为阳性。根据变红的深浅定义菌株硝酸盐还原酶活力的大小, 粉红色“+”、玫红色“++”、血红色“+++”、红褐色“++++”; 未加锌粉时不变色, 加锌粉后变红“−”。

蛋白酶、脂肪酶实验: 挑取乳酸菌单菌落, 分别点种于蛋白酶、脂肪酶培养基平板上, 37 ℃ 培养 3~4 d, 观察透明圈产生情况, 以菌落中心为圆心, 并分别量取菌落半径和透明圈半径(单位: cm), 以二者半径的差值定义菌株蛋白/脂肪酶活力的大小, 0≤差值≤0.1“+”、差值为 0.2“++”、差值为 0.3“+++”、差值为 0.4“++++”、差值≥0.5“+++++”、无透明圈“−”。

1.2.3.2 耐受性实验 参照 Chen 等[19] 的方法, 配制耐低温、高酸、高食盐和高亚硝酸盐培养基。

耐受性实验: 挑取乳酸菌单菌落分别接种于耐酸(pH4.48~4.52)、耐食盐(60 g/kg)、耐低温(10 ℃)、耐亚硝酸盐(150 mg/kg)培养基中, 37 ℃, 150 r/min 培养 24~48 h, 根据培养基浑浊程度定义菌株耐受能力的强弱, 阳性为“+、++、+++”, 阴性为“−”。

1.2.3.3 生长曲线和产酸能力实验 将分离的乳酸菌接入 MRSB 培养基中, 37 ℃ 下培养 24 h, 以不接菌的培养基为空白对照, 每 2 h 测定培养液的吸光度($OD_{600\ nm}$)和 pH。

1.2.4 安全性能评价实验

1.2.4.1 溶血实验 参照 Chen 等[19] 的方法进行溶血实验, 并进行结果判定。挑取单菌落划线于血平板上, 37 ℃ 倒置培养 48 h, 观察是否溶血, 以 β 溶血的金黄色葡萄球菌 ATCC 43300 和 α 溶血的表皮葡萄球菌 S125 为阳性对照。若菌落周围出现草绿色溶血圈, 则判定为 α 溶血; 若菌落周围出现透明溶血圈, 则判定为 β 溶血, α 和 β 溶血现象为阳性结果。若未出现溶血圈, 则判断为 γ 溶血(即不溶血), 为阴性结果。

1.2.4.2 明胶液化实验 参照王琪等[21] 的方法, 挑取单菌落以穿刺接种于提前制好并冷却凝固的明胶培养基, 37 ℃ 培养 48 h。培养结束后置于 4 ℃ 冰箱内, 放置 2 h。取出观察实验现象, 若培养基融化, 则判定为阳性, 否则判定为阴性。以金黄色葡萄球菌 ATCC 43300 为阳性对照, 接入无菌水的明胶培养基为阴性对照。

1.2.4.3 吲哚实验 参照王琪等[21] 的方法进行检测, 挑取单菌落接种于蛋白胨水培养基中, 37 ℃ 培养 48 h, 滴加 4~5 滴乙醚, 振荡, 静置, 再滴加吲哚试剂。如果乙醚层变红, 则为阳性, 否则为阴性。以大肠埃希氏菌 CICC 21530 为阳性对照, 以接入无菌水的蛋白胨水培养基为阴性对照。

1.2.4.4 偶氮还原酶实验 参照杨埔[22] 的方法进行检测, 将活化后的菌株涂布于含有 5 mg/mL 直接蓝 71 平板上, 37 ℃ 培养 72 h, 观察是否有水解圈的产生。

1.2.4.5 耐药性实验 根据美国临床和试验室标准化研究所制定的《抗菌药物敏感性试验执行标准》(2021 年版)评价试验菌株对抗生素的耐药性, 利用药敏纸片琼脂扩散法(K-B 法)对乳酸菌进行耐药性实验。挑取单菌落于无菌生理盐水中, 使用涡旋振荡器混匀实验菌液, 调节菌液浓度 1×10^7 CFU/mL。将菌液均匀涂布于 MH 琼脂平板上, 静置片刻, 将药敏纸片贴于培养基上, 37 ℃ 倒置培养 20 h, 测量并记录各药敏纸片的抑菌圈直径。

1.2.5 猪肉汤发酵实验

1.2.5.1 菌株间的拮抗实验 参照吴双慧等[23] 的方法, 挑取乳酸肠球菌 L2、植物乳杆菌 L77 与木糖葡

萄球菌 S120 的单菌落，将 L2、L77 分别与 S120 以十字交叉的形式划线于 PCA 平板上，观察交叉处是否有菌落生长。

1.2.5.2　猪肉汤的制备　将肥瘦比为 1∶4 的猪肉，煮沸 40 min，煮沸后的肉汤用纱布初步过滤，控制滤出液为 300 mL。再将滤液用定性滤纸过滤两次，以澄清滤液，于 121 ℃ 下高压灭菌 15 min，得到无菌猪肉汤。

1.2.5.3　猪肉汤发酵液挥发性风味物质的测定　a. 样品的制备：分别吸取乳酸肠球菌 L2、植物乳杆菌 L7、木糖葡萄球菌 S120 的新鲜菌液 2 mL 加入无菌猪肉汤培养基中（2% 接种量），分别吸取 L2 和 S120 各 1 mL，L77 和 S120 各 1 mL 加入无菌猪肉汤中，37 ℃，150 r/min，发酵 18 h。各取 5 mL 发酵液，加入 20 mL 顶空瓶中，随后加入 10 μL 内标环己酮（浓度为 0.475 μg/μL，25 μL 的环己酮用丙酮定容至 50 mL），用压盖器将顶空瓶密封。

b. 顶空固相微萃取/气相色谱-质谱分析方法（HS-SPME/GC-MS）：HS-SPME 条件：首先将盛装有样品的顶空瓶于 80 ℃ 恒温预孵化 10 min，然后用 50/30 μm DVB/CAR/PEMS 萃取针于 80 ℃ 条件下萃取 30 min，最后将萃取针在进样口 230 ℃ 解吸 2 min。

GC 条件：使用 TG-WAXMSB 极性色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm），不分流模式，进样口温度 230 ℃，升温程序：初始柱温 40 ℃，维持 3 min，再以 5 ℃/min 的升温速率升温至 210 ℃，维持 5 min，载气为氦气（纯度>99.999%），流速 1 mL/min。

MS 条件：接口温度 210 ℃，传输线温度 230 ℃，电压 1.2 kV，全扫描模式，质量扫描范围 40~500 m/z，扫描时间 2 s，离子源温度 250 ℃，EI 离子源，电子能量 70 eV。

c. 挥发性风味物质定性与定量分析：参照吴双慧等[23] 的方法，由计算机自动检索（NIST 08）进行定性分析，结合 Xcalibur 软件系统进行手动对照检索，匹配度（SI）和反匹配度（RSI）要求均大于 800，可能性大于 80%。依据化合物的峰面积比值与含量成正比的原理进行定量分析，计算公式如下：

$$C = \frac{A_X \times C_0 \times V \times 1000}{A_0 \times m}$$

式中：C 为测定物质的质量浓度（μg/kg）；A_x 为测定物质的峰面积（AU·min）；C_0 为内标物浓度（μg/μL）；V 为内标物进样体积（μL）；A_0 为添加的内标物峰面积（AU·min）；m 为测定样品质量（g）。

d. 关键风味化合物的评定：参照刘登勇等[24] 的方法，利用相对气味活度值（Relative Odor Activity Value，ROAV）法确定发酵肉汤中的关键挥发性风味物质。公式如下：

$$OAV = \frac{C}{T}$$

$$ROAV_i = \frac{OAV_i}{OAV_{max}} \times 100$$

式中：OAV 为气味活度值（Odor Activity Value，OAV）；C 为所测定的挥发性化合物的质量浓度（μg/kg）；T 为相同物质的风味阈值（μg/kg）；$ROAV_i$ 为某组分的相对气味活度值；OAV_i 为某组分的气味活度值，OAV_{max} 为对样品总体风味贡献最大的组分的气味活度值。$ROAV_i \geqslant 1$ 的组分为所分析样品的关键风味化合物，$0.1 \leqslant ROAV_i < 1$ 的组分对样品的总体风味具有重要的修饰作用。

1.3　数据处理

所有实验均重复测定三次，实验结果以“平均值±标准偏差”表示，采用 Excel 2019 对挥发性风味物质数据进行统计分析，采用 Origin 2018 作图。

2　结果与分析

2.1　菌株分离与鉴定结果

从四川、贵州、安徽、甘肃 4 个地区采集的 30 份发酵肉制品、10 份浆水中，采用 MRSA 平板分离、纯化，剔除形态相似的菌落，挑取形态呈圆形，乳白色，表面光滑，湿润，在平板上呈突起状，边缘整齐的疑似乳酸菌 70 株。将分离菌株的 16S rRNA 扩增产物拼接结果进行同源性比对分析。根据 16S rDNA 系统发育树鉴定结果可知，菌株 L111 与清酒广布乳杆菌（*Lactilactobacillus sakei*）聚在同一个分

表 1　乳酸菌鉴定结果

Table 1　Identification results of lactic acid bacteria

菌株编号	中文名称	拉丁学名	数量（株）
L2	乳酸肠球菌	*Enterococcus lactis*	1
L12	类鸟肠球菌	*Enterococcus pseudoavium*	1
L30	弯曲乳杆菌	*Latilactobacillus curvatus*	1
L44、L86、L92	格氏乳球菌	*Lactococcus garvieae*	3
L66	肠系膜明串珠菌	*Leuconostoc mesenteroides*	1
L77	植物乳杆菌	*Lactiplantibacillus plantarum*	1
L81、L84、L85	希腊魏氏菌	*Weissella hellenica*	3
L87、L111	清酒广布乳杆菌	*Latilactobacillus sakei*	2
L98、L128、L131、L142、L150	粪肠球菌	*Enterococcus faecalis*	5
L151、L152	屎肠球菌	*Enterococcus faecium*	2

支上，且序列比对显示同源性达 99.73%。L77 与植物乳杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）在同一个分支上，同源性达 99.86%。L98 与粪肠球菌（*Enterococcus faecalis*）聚在同一分支上，同源性达 99.59%。因此，鉴定 L111 为清酒广布乳杆菌，L77 为植物乳杆菌，L98 为粪肠球菌。对分离得到的 70 株疑似乳酸菌进行序列比对分析，其中有 20 株为乳酸菌，鉴定结果见表 1。

2.2 产酶性能实验结果

具有硝酸盐还原酶活力的菌株，能将硝酸盐还原为亚硝酸盐，经一系列反应，与肌红蛋白反应形成亚硝基肌红蛋白，使发酵肉制品具有持久、鲜艳的红色[25]。如图 1A、图 1B 所示，未加锌粉前，加入硝酸盐还原试剂后，L81、L150、L151 变成了红色，其余菌株均未变色，此时变色菌株可直接判定为阳性结果，并根据变红深浅定义菌株的硝酸盐还原酶活力大小。20 株乳酸菌中，L2、L12、L44、L77、L84、L85、L86、L87、L92、L98、L111、L131、L142、L152 为阴性（−），不产硝酸盐还原酶，L81 和 L128 酶活力较弱（+），L30 和 L66 酶活力中等（++），L151 酶活力较强（+++），L150 酶活力最强（++++）。所有测试菌株发酵性能实验结果见附表 1（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。

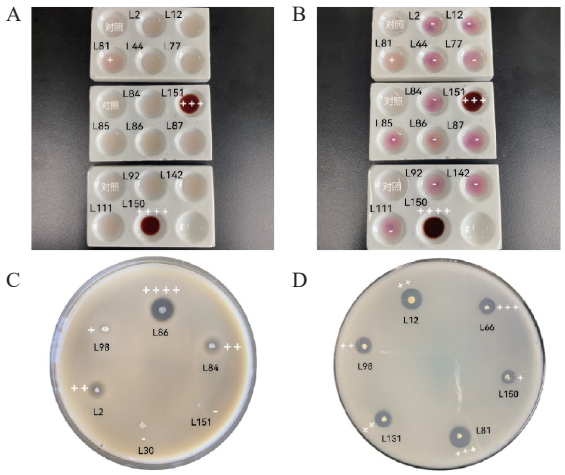


图 1 乳酸菌产酶性能实验结果

Fig.1 Enzyme production results of lactic acid bacteria

注：A、B 为硝酸盐还原酶实验结果，其中 A 为加锌粉前，B 为加锌粉后；C 为蛋白酶实验结果；D 为脂肪酶实验结果。

蛋白酶能使蛋白质分解为多肽和游离氨基酸，从而使肉类产品中的香味物质直接或间接地被释放出来。脂肪酶则能促进脂肪水解，减少肉类脂肪的含量，提高脂肪中饱和脂肪酸含量，从而间接地参与肉类中的香味成分的积累[26]。根据水解圈半径与菌株半径之差，可将蛋白酶和脂肪酶酶活力实验结果分为 5 个等级。图 1C 为菌株蛋白酶实验结果，可以看出无蛋白酶活力的乳酸菌有 2 株，分别是 L30 和 L151，剩余菌株中 L12、L44、L66、L81、L85、L87、L98、L111、L142、L152 酶活力较弱（+），L2、L84、L92、L131 酶活力一般（++），L77、L128、L150 酶活力中等（+++），L86 酶活力较好（++++），没有酶活力很强（+++++）的菌株。可见 20 株菌株中 18 株具有蛋白酶活力，大部分受试乳酸菌都具有蛋白酶活力，但酶活力普遍不强。图 1D 为菌株脂肪酶实验结果，由结果可知 L30、L44、L77、L85、L86、L87、L92、L128、L142、L151、L152 均无脂肪酶活力，剩余菌株中 L84、L111、L150 酶活力较弱（+），L12、L98、L131 酶活力一般（++），L66、L81 酶活力中等（+++），L2 酶活力较好（++++），没有酶活力很强（+++++）的菌株。可知 20 株菌株中只有 9 株具有脂肪酶活力，且酶活力都不强。

2.3 耐受性能实验结果

肉制品在发酵过程中 pH 会有所下降，大部分肉制品如发酵香肠，初期 pH 一般在 6.0 左右，根据产品类型不同，发酵终期 pH 通常在 4.5~5.5 左右。其次发酵肉制品的晾晒环境温度不宜太高，否则容易发生腐败变质，通常在 10~15 ℃ 之间[6]。发酵肉制品的终产品中，由于水分丧失，食盐的含量一般高达 6%[27]。发酵肉制品还需要添加亚硝酸盐起到发色和抑菌的作用，但我国食品添加剂使用标准中明确规定发酵肉制品中亚硝酸盐的添加量不超过 150 mg/kg。因此要求筛选的菌株需具有耐酸性能、耐低温能力、耐受 6% 的 NaCl、有较强的耐亚硝酸盐能力，无论是在酸性、低温环境、高盐还是高亚硝酸盐的条件下都能够生长，发挥其本身的作用。

图 2 为乳酸菌在各极端条件下的生长情况，根据培养基的浑浊程度，培养基越浑浊，耐受能力越强，以此对受试菌株的耐受能力进行分级。由耐酸结果可知，L30、L44、L84、L85、L98、L128、L142、L150、L152 均不耐酸，L12、L81、L87、L92、L131 的耐酸能力较弱（+），L2 的耐酸能力中等（++），L66、L77、L86、L111、L151 耐酸能力很强（+++）。受试菌株中有一半具有耐酸能力，其中 L77 的耐酸性能很强，产酸性能也优于其余菌株，说明 L77 可能具有较好的发酵能力。由耐低温结果可知，L30、L84、L128、L150、L152 不耐低温，L81、L85、L98、L142 耐低温能力较弱（+），L12、L92、L131 耐低温能力中等（++），L2、L44、L66、L77、L86、L87、L111、L151 耐低温能力很强（+++）。具有耐低温性能的乳酸菌能占到总菌株数的 75%，且耐低温能力很强的菌株占比最多。由耐食盐结果可知，仅有 L44、L84、L87、L92 不具有耐盐能力，L12、L85、L142、L152 耐盐能力较弱（+），L98、L128、L150 耐盐能力中等（++），L2、L30、L66、L77、L81、L86、L111、L131、L151 耐盐能力很强（+++）。具有耐盐性能的乳酸菌共有 16 株，占菌株总数的 80%，且一半的菌株都具有很强的耐盐能力。由耐 $NaNO_2$ 结果可知，所有菌株均能耐受 150 mg/kg 的 $NaNO_2$，L12、L66、L77、L150 耐受能力较弱（+），L98、L152 耐受能力中等

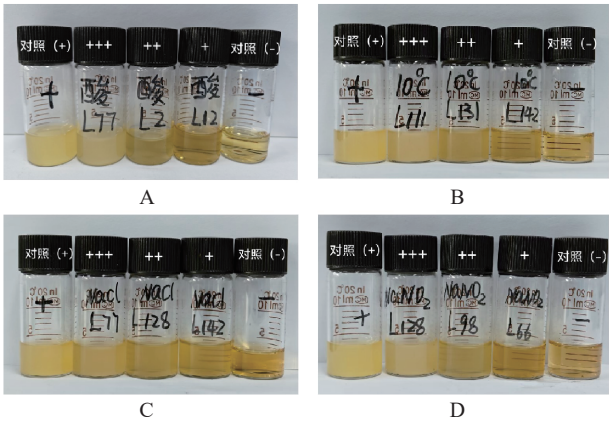


图 2　乳酸菌的耐受性实验结果

Fig.2　Tolerance results of lactic acid bacteria

注：A 为耐酸实验结果，阳性对照为培养基初始 pH6.5 下培养的菌液，阴性对照为培养基 pH4.48~4.52 下未接菌的培养基；B 为耐低温实验结果，阳性对照为 37 ℃ 下培养的菌液，阴性对照为 10 ℃ 条件下接入无菌水的培养基；C 为耐食盐实验结果；D 为耐亚硝酸盐实验结果。耐食盐与耐亚硝酸盐实验中阳性和阴性对照与耐低温实验相同。

（++），其余菌株 L2、L30、L44、L81、L84、L85、L86、L87、L92、L111、L128、L131、L142、L151 的耐受能力均很强（+++）。综合各项耐受能力结果来看，L86、L111、L151 的耐受能力最强，在四种极端环境下耐受能力均能达到最高等级（+++），L2、L66、L77 的耐受能力次之，但也能在三种极端环境下达到最高等级（+++）。

2.4　乳酸菌生长曲线及产酸能力测定结果

在发酵香肠加工过程中，乳酸菌的生长繁殖使得香肠的 pH 迅速下降，抑制有害微生物生长，从而使得产品具有良好的风味和微生物安全性。产酸能力是衡量乳酸菌作为发酵剂菌种性能优良的重要指标之一。实验测定了 20 株乳酸菌的生长和产酸能力，图 3 为乳酸菌的生长曲线和产酸曲线。结果发现，20 株乳酸菌中大部分乳酸菌培养液 pH 集中在 4.0~5.0 之间，并且大部分菌株生长能力相差不大，24 h 时 $OD_{600\ nm}$ 集中在 1.0~2.0 之间。其中 L84 和 L142 产酸能力最差，最低 pH 均高于 5.0，L77 的产酸能力最强，pH 最低时低于 4.0，并且同样时间下 L77 的生长能力最强。

2.5　乳酸菌安全性实验结果

根据前述发酵性能实验结果，乳酸菌 L30、L84、L85、L87、L150 和 L152 不具有较好的耐受能力，L142 和 L12 产酸能力太弱，因此以上菌株不作为备选菌株，最终筛选出 12 株乳酸菌进行安全性能检测。图 4A、图 4B、图 4C 所示是乳酸菌的溶血实验结果，受试的 12 株乳酸菌的溶血实验结果均为阴性；图 4D 是乳酸菌在明胶培养基中的实验结果，阳性对照组发生了明显的液化现象，而实验菌株仍然保持凝固状态，受试的 12 株乳酸菌均未出现明胶液化现象，说明这些菌株均不会产生明胶酶来分解明胶；图 4E 为乳酸菌吲哚实验结果，阳性对照组液面出现

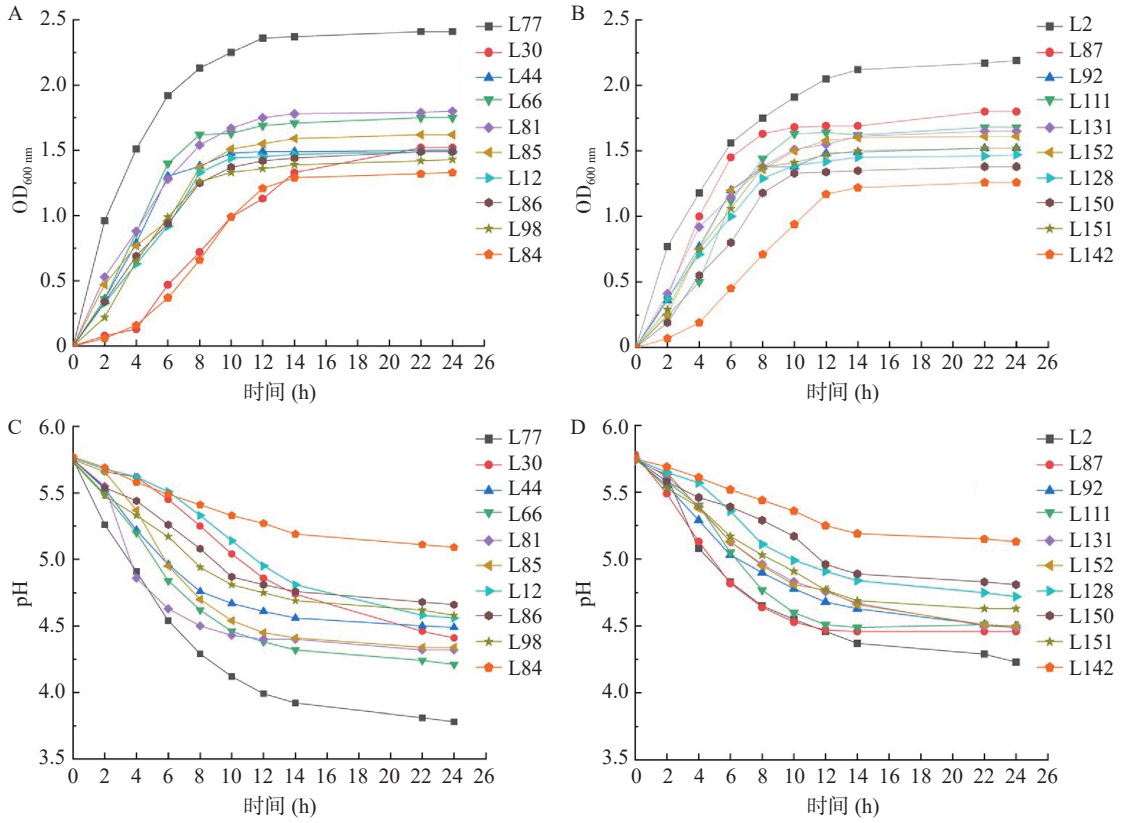


图 3　乳酸菌的生长曲线及产酸能力结果

Fig.3　Growth curves and acid production capacity of lactic acid bacteria

注：A、B 为乳酸菌 24 h 生长曲线；C、D 为乳酸菌 24 h 产酸曲线。

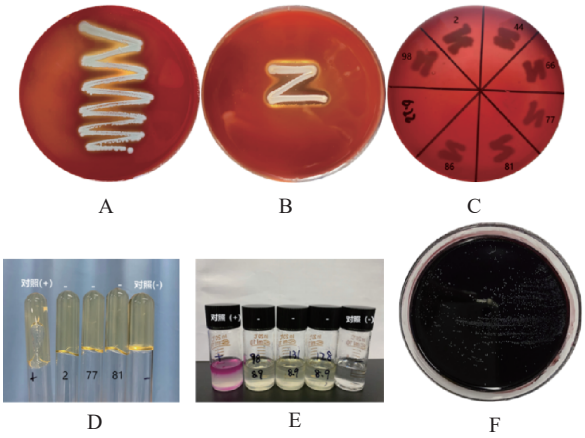


图 4 乳酸菌安全性能实验结果

Fig.4 Safety evaluation results of lactic acid bacteria

注: A 为表皮葡萄球菌 S125 的 α 溶血结果; B 为金黄色葡萄球菌 ATCC 43300 β 溶血结果; C 为乳酸菌溶血实验结果; D 为明胶液化实验结果, 其中阳性对照为金黄色葡萄球菌 ATCC 43300, 阴性对照为接入无菌水的蛋白胨水培养基; E 为吲哚实验结果, 其中阳性对照为大肠埃希氏菌 CICC 21530, 阴性对照为接入无菌水的明胶培养基; F 为偶氮还原酶实验结果。

了明显的玫瑰红色, 而实验菌株和阴性对照均无颜色变化, 受试的 12 株乳酸菌结果均为阴性, 说明这些菌株不会代谢色氨酸产生吲哚; 图 4F 是乳酸菌偶氮还原酶实验结果, 所有受试菌株均未出现透明圈, 结果为阴性。由上述结果可知, 所选 12 株乳酸菌全部通过安全性检测。所有测试菌株安全性能实验结果详见附表 2(附表 2, 详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版)。

图 5 为植物乳杆菌 L77 耐药性实验现象, 表 2 为 12 株乳酸菌的耐药实验结果。在 12 株菌株中, 对万古霉素耐药的菌株有 1 株(8.33%), 对青霉素 G 耐药的菌株有 2 株(16.67%), 对头孢噻肟耐药的有 2 株(16.67%), 对多粘菌素 B 耐药的有 6 株(50%), 对卡那霉素耐药的有 3 株(25%), 对链霉素耐药的有 4 株(33.33%), 对四环素类耐药的菌株有 5 株

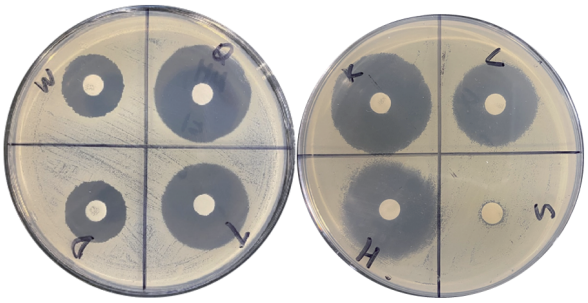


图 5 植物乳杆菌 L77 耐药性实验结果

Fig.5 Drug resistance results of *Lactiplantibacillus plantarum* L77

注: W 为万古霉素; Q 为青霉素 G; T 为头孢噻肟、D 为多粘菌素 B; K 为卡那霉素; L 为链霉素; S 为四环素; H 为红霉素。

(41.67%), 对红霉素均表现为不耐药。其中, L44 只对一种抗生素耐药, L86、L92、L151 为双重耐药, L81、L128、L131 为多重耐药, L2、L66、L77、L98、L111 对所有抗生素均不耐药。可见受试的大部分乳酸菌对 8 种抗生素表现出不同程度的耐药性, 受试乳酸菌对多粘菌素 B、链霉素和四环素类耐药性较高。在乳酸菌的安全性评价中, 耐药性是重要的指标, 由于目前抗生素的大量使用, 许多乳酸菌对抗生素产生了抗性, 当人们食用了携带耐药基因的菌株发酵的肉制品, 这些耐药基因可能会进入人体内, 使人体携带抗药基因, 对人体健康造成威胁。许女等[28]对分离的乳酸菌进行耐药性实验, 发现菌株对所有测试抗生素均呈不同程度的耐药性, 其中对万古霉素、卡那霉素、链霉素和四环素类的耐药性较强。可见, 乳酸菌的耐药性已成为食品安全的严重隐患, 筛选不具备耐药性的菌株应用于食品实际发酵显得更加重要。实验初步确定菌株 L2、L77、L66、L98、L111 为抗生素敏感型菌株, 可用于后续发酵实验。

2.6 分离菌株发酵肉汤挥发性风味化合物分析

对发酵肉制品风味有贡献的物质包括醛类、酮类、醇类、酯类、酸类和其他类。这些风味物质主要是由脂质氧化分解、蛋白质降解代谢以及碳水化合

表 2 乳酸菌对 8 种抗生素的耐药实验结果

Table 2 Resistances to eight antibiotics of lactic acid bacteria

菌株编号	万古霉素	青霉素G	头孢噻肟	多粘菌素B	卡那霉素	链霉素	四环素类	红霉素
L2	30(S)	35(S)	25(S)	30(S)	28(S)	15(S)	25(S)	30(S)
L44	30(S)	40(S)	30(S)	5(R)	25(S)	15(S)	17(I)	38(S)
L66	23(S)	33(S)	27(S)	21(S)	33(S)	20(S)	35(S)	34(S)
L77	24(S)	31(S)	24(S)	18(S)	25(S)	18(S)	15(I)	23(S)
L81	25(S)	29(S)	18(I)	0(R)	0(R)	0(R)	0(R)	25(S)
L86	30(S)	33(S)	25(S)	0(R)	30(S)	13(I)	6(R)	30(S)
L92	28(S)	35(S)	30(S)	0(R)	23(S)	10(R)	29(S)	35(S)
L98	15(I)	35(S)	26(S)	12(S)	23(S)	19(S)	24(S)	27(S)
L111	20(S)	30(S)	25(S)	13(S)	25(S)	18(S)	23(S)	30(S)
L128	21(S)	19(R)	0(R)	0(R)	12(R)	0(R)	0(R)	23(S)
L131	12(R)	21(R)	0(R)	0(R)	18(S)	0(R)	0(R)	23(S)
L151	23(S)	29(S)	25(S)	13(S)	0(R)	15(S)	10(R)	14(I)

注: S为susceptible, 指细菌对抗生素敏感; I为intermediate, 指细菌对抗生素中度敏感; R为resistance, 指细菌对抗生素耐药。

物的分解产生[29]，能赋予发酵肉制品不同的独特风味。通过发酵性能、安全性能及对发酵肉制品最重要的产酸能力评价综合筛选出相对优势的植物乳杆菌 L77 和乳酸肠球菌 L2，与实验室前期筛选得到的木糖葡萄球菌 S120 复配接种猪肉汤，评价菌株作为发酵剂在发酵肉制品实际生产中对风味的影响。将 L2 和 L77 分别与 S102 进行拮抗实验，发现其均不产生拮抗作用，于是将 3 种单菌和 2 种复配组合分别接种猪肉汤中进行发酵。产生的风味化合物按种类主要分为醛类、酮类、醇类、酯类和其他类，其中醛类 11 种、酮类 9 种、醇类 20 种、酯类 4 种、其他类 14 种。L2、L77、S120、L2-S120、L77-S120 检出的挥发性风味化合物分别为 21、22、20、17、23 种；L77、L77-S120 的物质总含量显著高于其他三组菌株。综合这两个指标来看，L77、L77-S120 无论在风味物质数量还是含量方面都优于其他三组。

然而，仅通过整体风味化合物的含量和数量来评价菌株的产香能力有一定的局限性，整体风味化合物的数量和含量只能说明产生的风味化合物的丰富程度。挥发性物质对发酵肉制品的风味贡献作用主要由浓度和阈值决定[24]。此外，在肉品发酵过程中会产生多种不同气味类型的风味物质，由于发酵肉制品的典型风味是油脂香和奶油香，而花香、果香及坚果香、蘑菇香等其他香味对发酵肉的主体风味而言并不是特别重要。因此，具备良好的产油脂香和/或奶油香能力是优良肉品发酵剂的基本性能。因此，采用相对活度阈值法进一步分析，确定各菌株发酵产生的关键性风味化合物（ROAV≥1）和修饰性风味化合物

表 3　发酵猪肉汤的主体挥发性风味化合物

Table 3　Main volatile flavors of pork soup fermented with different groups

物质种类	阈值（μg/kg）	ROAV≥0.1				
		L2	L77	S12	L2-S120	L77-S120
醛类						
苯甲醛	750.89	–	0.15	–	–	0.15
2-十二烯醛	1.40	6.06	–	–	–	–
壬醛	1.10	–	34.75	7.02	–	27.07
十一醛	12.50	0.93	–	–	–	–
反式-2-壬醛	0.15	100.00	–	–	–	–
酮类						
2-壬酮	41.00	0.82	3.74	–	0.32	1.64
环十五酮	2.70	–	84.55	–	–	–
2-十二酮	42.00	–	–	0.14	–	–
2-十一酮	5.50	–	80.05	–	–	35.83
5-甲基-2-己酮	62.00	–	–	0.12	–	–
醇类						
1-辛烯-3-醇	1.50	5.80	–	6.45	13.69	16.99
2-乙基己醇	300.00	–	0.10	–	–	–
芳樟醇	0.22	45.35	100.00	–	100.00	100.00
壬醇	45.50	1.57	2.13	–	0.71	1.63
十六醇	1100.00	–	0.24	–	–	–
2-十一醇	8.60	–	–	–	–	4.46
十一醇	700.00	0.13	–	–	0.10	–
庚醇	5.40	–	–	–	2.54	–
辛醇	125.80	–	0.71	–	–	–
月桂醇	16.00	1.93	–	1.10	–	15.08
(E,Z)-金合欢醇	87.00	–	0.45	–	–	–
癸醇	8.20	–	35.50	–	–	–
酯类						
γ-壬内酯	9.70	–	1.46	–	–	1.49
其他类						
1-甲基萘	7.50	5.65		1.63	7.50	18.83
2,6-二叔丁基对甲酚	1000.00	–	0.12	–	–	–
苯并噻唑	80.00	–	–	–	0.12	–
萘	6.00	–	5.71	0.79	–	4.54
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	0.04	–	–	100.00	–	–
间甲酚	15.00	–	–	–	–	0.92
d-柠檬烯	200.00	–	0.10	–	–	–

注：“–”表示未检出，表中阈值确定来源于《化合物嗅觉阈值汇编 第二版》。

表 4 发酵猪肉汤主体挥发性风味物质的香型分类(ROAV≥0.1)

Table 4 Aroma classification of main volatile flavors of fermented pork soup with different groups (ROAV≥0.1)

物质名称	香气描述	含量(μg/kg)				
		L2	L77	S120	L2-S120	L77-S120
壬醛	花香,强油脂气味	–	183.26±1.87	82.72±0.95	–	135.93±1.65
反式-2-壬醛	烤鸡肉,猪肉香	172.88±3.14	–	–	–	–
2-十二烯醛	柑橘香,脂肪气味	77.20±0.58	–	–	–	–
2-壬酮	油脂香,花香,水果香	306.18±18.53	736.01±20.65	–	91.20±0.95	306.65±9.65
2-十二酮	果香,橙皮香,脂香	–	–	164.76±15.63	–	–
2-十一酮	油脂香,芸香,桃子香	–	2110.96±78.94	–	–	899.79±25.63
十六醇	脂香,玫瑰香	–	1270.60±46.28	–	–	–
壬醇	玫瑰花香,脂香,橙香	651.23±20.78	465.66±9.63	–	224.89±6.63	337.68±2.87
十一醇	脂香,柠檬香	436.95±21.52	–	–	495.31±10.27	–
月桂醇	紫罗兰香,油脂香	280.28±23.27	–	189.28±2.12	–	1101.86±50.12
辛醇	油脂果香,草香	–	430.26±9.52	–	–	–
癸醇	玫瑰香,橙花香,油脂香	–	1395.71±49.52	119.49±1.75	–	–
庚醇	油脂气息,辛辣香,柑橘香	–	–	–	95.28±1.06	–
	油脂香型	1924.72	6592.47	556.24	906.69	2781.91
γ-壬内酯	椰子香,有杏仁香,可用于需有油脂气息的香精	–	67.72±0.73	–	–	65.81±0.51
	奶油香型	0	67.72	0	0	65.81
苯甲醛	苦杏仁,樱桃及坚果香	–	550.19±17.46	–	–	261.57±8.46
1-辛烯-3-醇	蘑菇香,花香和干草香气	79.15±0.68	–	103.66±1.56	142.85±1.43	116.35±1.56
芳樟醇	铃兰香,玫瑰香,又有木香	90.77±1.90	105.49±1.53	–	153.00±1.57	100.44±1.03
十一醛	脂蜡香,花香	105.23±2.96	–	–	–	–
(E,Z)-金合欢醇	铃兰花香,木香	–	187.85±1.63	–	–	–
d-柠檬烯	橙子香,柠檬香	–	95.38±0.92	–	–	–
2-乙基己醇	淡淡的花香	–	137.72±1.67	–	–	–
2-十一醇	具有花香味	–	–	–	–	175.12±2.43
	花果香型	275.14	1076.64	103.66	295.85	653.49
1-甲基萘	香樟木气味	385.47±10.42	–	131.18±2.47	391.09±7.84	644.94±7.53
2,6-二叔丁基对甲酚	有特殊气味	–	558.00±17.53	–	–	–
萘	香樟木气味	–	164.16±1.92	51.08±0.54	–	124.23±7.53
5-甲基-2-己酮	令人愉快的气味	–	–	181.74±1.79	–	–
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	坚果花生香、面包香	–	–	42.86±0.46	–	–
环十五酮	麝香香气	–	1094.57±30.87	–	–	–
间甲酚	具有甜味	–	–	–	–	63.14±0.61
苯并噻唑	呈喹啉似气味	–	–	–	67.07±0.84	–
	总计	2858.32	9553.55	1066.76	1660.69	4333.52

注:“–”表示未检出;表中物质的风味描述来自于The Good Scents Company Information System(http://www.thegoodscentscompany.com)与数据库(http://www.flavornet.org/flavornet.html)。

(0.1≤ROAV<1),结果如表 3 所示。在此基础上,对风味有贡献的主体风味化合物(ROAV≥0.1)进行香型分类,如表 4 所示。

由表 3 可以看出,不同主体化合物之间存在差异,L2、L77、S120、L2-S120、L77-S120 发酵产生的主体挥发性风味物质(ROAV≥0.1)的数量和含量分别为 10 种(2858.32 μg/kg)、16 种(9553.55 μg/kg)、8 种(1066.76 μg/kg)、8 种(1660.69 μg/kg)、13 种(4333.52 μg/kg),L77 组在主体挥发性风味物质的数量和含量上均远高于其他组别。刘睿茜等[30]的研究也发现,加入植物乳杆菌 CMRC 19 的羊肉发酵液挥发性风味物质总含量明显增加,同时具有脂肪香化合物(如壬醛、癸醛等)的含量显著高于不接菌自然发酵组。

对于发酵肉制品来说,其典型香味特征是油脂香和奶油香,将主体风味化合物按照油脂香、奶油香、花果香和其他香四种香型进行分类,结果如表 4 所示。各组别中呈油脂香、奶油香的化合物的数量和含量分别为 L2 组 6 种(1924.72 μg/kg)、L77 组 8 种(6660.19 μg/kg)、S120 组 4 种(556.24 μg/kg)、L2-S120 组 4 种(906.69 μg/kg)、L77-S120 组 6 种(2847.72 μg/kg),可见 L77 组和 L77-S120 组在典型挥发性风味物质的含量和数量上仍占有优势,发酵肉汤具有更突出的油脂香和奶香风味。吴双慧等[23]在研究中也发现,将植物乳杆菌与木糖葡萄球菌复配用于发酵香肠,复配组中油脂香和奶油香化合物的数量和含量(10 种,2039.59 μg/kg)高于空白组(7 种,1249.57 μg/kg),同时复配组中 ROAV≥0.1 的挥发

性物质的数量（20 种）也高于空白组（12 种）。

在具有油脂香和奶油香的化合物中，L77 组和 L77-S120 组的壬醛、2-壬酮、2-十一酮、γ-壬内酯含量均明显高于其他组别，且十六醇和辛醇仅在 L77 组检出。王雍雍等[31]将植物乳杆菌（Lp10、LpN）单独和与腐生葡萄球菌（Ss）复配发酵香肠，结果表明单独接菌组 Lp10 的脂肪香化合物（壬醛、癸醛、辛醇）含量为 103.68 μg/kg，复配组 Lp10+LpN+Ss 为 127.33 μg/kg，均显著高于不接菌组的 53.27 μg/kg。与本研究中 L77 组和 L77-S120 组猪肉汤的油脂香和奶油香风味明显优于其他组别的结果相似。

3　结论

本研究从四川、贵州、安徽、甘肃采集的 40 份传统发酵食品中分离鉴定得到 20 株乳酸菌，经鉴定隶属于 10 个种。通过对分离菌株进行发酵性能检测，筛选得到产酶性能、耐受性能、产酸能力优异的菌株 12 株，对其进行溶血、吲哚、偶氮还原酶、明胶液化和耐药性的安全性评价，表现安全的菌株有 L2、L77、L66、L98、L111 共 5 株。其中乳酸肠球菌 L2 综合发酵性能最好，植物乳杆菌 L77 的产酸能力和生产能力最强，挑选菌株 L77、L2，分别与木糖葡萄球菌 S120 单独和复配接种猪肉汤进行发酵，结果显示，L77 组和 L77-S120 组发酵产生的主体挥发性风味物质（ROAV≥0.1）的数量和含量分别为 16 种（9553.55 μg/kg）、13 种（4333.52 μg/kg），典型香味特征油脂香、奶油香的化合物的数量和含量分别为 8 种（6660.19 μg/kg）、6 种（2847.72 μg/kg），可见无论是主体挥发性风味物质还是典型香味特征，两组的数量和含量均远高于其他组别。最终筛选到风味特征优良的 L77 组和 L77-S120 组，为实际肉制品发酵提供有价值的参考。研究结果为挖掘发酵肉制品中有益微生物、开发肉制品功能性发酵剂提供了科学参考。

© 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］ 马剑，陈智玲，张宏志，等. 乳酸菌发酵梨汁过程中的品质变化及其抗氧化活性研究［J］. 山西农业大学学报（自然科学版），2021，41（6）：123−128. ［MA Jian, CHEN Zhiling, ZHANG Hongzhi, et al. Study on the quality change and antioxidant activity of pear juice fermented by lactic acid bacteria［J］. Journal of Shanxi Agricultural University（Natural Science Edition），2021，41（6）：123−128.］

［2］ 张香美，赵玉星，闫晓晶，等. 1 株具抑菌和抗氧化活性乳酸菌的筛选及鉴定［J］. 食品科学，2018，39（2）：93−98. ［ZHANG Xiangmei, ZHAO Yuxing, YAN Xiaojing, et al. Screening and identification of lactic acid bacterium with antimicrobial and antioxidant activity［J］. Food Science，2018，39（2）：93−98.］

［3］ ZHAO Shanshan, ZHANG Qiuxiang, HAO Guangfei, et al. The protective role of glycine betaine in *Lactobacillus plantarum* ST-III against salt stress［J］. Food Control，2014，44：208−213.

［4］ 孔保华，李悦欣，张欢，等. 乳酸菌抗氧化活性及其在发酵肉制品中的应用研究进展［J］. 肉类研究，2022，36（10）：35−42. ［KONG Baohua, LI Yuexin, ZHANG Huan, et al. Antioxidant activity of lactic acid bacteria and their application in fermented meat products：A review［J］. Meat Research，2022，36（10）：35−42.］

［5］ 谭雅，黄晴，曹熙，等. 发酵肉制品中常见有益微生物及其功能研究进展［J］. 食品工业科技，2016，37（21）：388−392. ［TAN Ya, HUANG Qing, CAO Xi, et al. Review of the common beneficial microorganisms of fermented meat and its functions［J］. Science and Technology of Food Industry，2016，37（21）：388−392.］

［6］ WANG Zhengli, WANG Zhengxi, JI Lili, et al. A review：Microbial diversity and function of fermented meat products in China［J］. Frontiers in Microbiology，2021，12：645435.

［7］ JIA Wei, ZHANG Rong, SHI Lin, et al. Effects of spices on the formation of biogenic amines during the fermentation of dry fermented mutton sausage［J］. Food Chemistry，2020，321：126723.

［8］ MEJRI L, HASSOUNA M. Characterization and selection of *Lactobacillus plantarum* species isolated from dry fermented sausage reformulated with camel meat and hump fat［J］. Applied Biological Chemistry，2016，59（4）：533−542.

［9］ 王德宝，孙学颖，王柏辉，等. 复合发酵剂对羊肉香肠发酵成熟过程中理化品质及安全性能的影响［J］. 中国食品学报，2020，20（6）：137−145. ［WANG Debao, SUN Xueying, WANG Baihui, et al. Effects of compound starters on physical-chemical quality and safety performance of fermented mutton sausages［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2020，20（6）：137−145.］

［10］ MANZOOR A, JASPAL M H, YAQUB T, et al. Effect of lactic acid spray on microbial and quality parameters of buffalo meat［J］. Meat Science，2020，159：107923.

［11］ LÜ Jing, LIN Xinping, LIU Mengyang, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* LXPSC1 on microorganisms and metabolites of sour meat during the fermentation［J］. Food Chemistry，2023，402：134213.

［12］ 王畏畏. 香肠发酵剂筛选及其在发酵香肠中的应用研究［D］. 扬州：扬州大学，2008. ［WANG Weiwei. Screening of sausage starter cultures and their application in fermented sausages［D］. Yangzhou：Yangzhou University，2008.］

［13］ SINGH V P, PATHAK V, VERMA A K. Fermented meat products：Organoleptic qualities and biogenic amines-a review［J］. American Journal of Food Technology，2012，7（5）：278−288.

［14］ 米瑞芳，陈曦，熊苏玥，等. 传统自然发酵酸肉中细菌群落多样性与风味品质分析［J］. 食品科学，2019，40（2）：85−92. ［MI Ruifang, CHEN Xi, XIONG Suyue, et al. Bacterial community diversity and flavor characteristics of traditional naturally fermented sour meat［J］. Food Science，2019，40（2）：85−92.］

［15］ JIANG Li, MU Yingchun, SU Wei, et al. Effects of *Pediococcus acidilactici* and *Rhizopus oryzae* on microbiota and metabolomic profiling in fermented dry-cure mutton sausages［J］. Food Chemistry，2023，403：134431.

［16］ LI Chunsheng, CUI Qiaoyan, LI Laihao, et al. Formation and improvement mechanism of physical property and volatile flavor of fermented tilapia surimi by newly isolated lactic acid bacteria based on two dimensional correlation networks［J］. Food Chemistry，2024，440：138260.

［17］ ZHENG Shasha, WANG Chunyu, HU Yingying, et al. Enhancement of fermented sausage quality driven by mixed starter

cultures: Elucidating the perspective of flavor profile and microbial communities[J]. Food Research International, 2024, 178: 113951.
[18] 胡此海, 杨絮, 郭全友, 等. 萝卜泡菜母水中乳酸菌分离鉴定与发酵特性比较[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 111−118, I0001. [HU Cihai, YANG Xu, GUO Quanyou, et al. Isolation, identification, and fermentation characteristics of lactic acid bacteria from the radish pickles brines[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 111−118, I0001.]
[19] CHEN Juan, ZHANG Jingbin, YANG Ziyao, et al. Characterization of indigenous coagulase-negative staphylococci isolated from Chinese spontaneously fermented meat products[J]. Microbiological Research, 2022, 263: 127160.
[20] 赵山山, 杨园园, 周玉岩, 等. 贵州泡菜中乳酸菌的分离鉴定及其在泡菜发酵中的应用[J]. 中国酿造, 2020, 39(12): 113−119. [ZHAO Shanshan, YANG Yuanyuan, ZHOU Yuyan, et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria from Guizhou pickles and its application in pickle fermentation[J]. China Brewing, 2020, 39(12): 113−119.]
[21] 王琪, 杨淑艺, 刘鹏帆, 等. 晋西北酸粥源短乳杆菌(*Levilactobacillus brevis*) M-10 安全性评估[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 32−37. [WANG Qi, YANG Shuyi, LIU Pengfan, et al. Safety assessment of *Levilactobacillus brevis* M-10 isolated from sour porridge in northwestern Shanxi[J]. China Condiment, 2024, 49(7): 32−37.]
[22] 杨埔. 食源性乳酸菌的安全性评价[D]. 济南: 山东大学, 2013. [YANG Pu. Safety assessment of food-borne lactic acid bacteria[D]. Jinan: Shandong University, 2013.]
[23] 吴双慧, 杨梓垚, 牛茵, 等. 复配发酵剂对发酵香肠的品质及挥发性风味的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 126−133. [WU Shuanghui, YANG Ziyao, NIU Yin, et al. Effects of mixed starter culture on quality and volatile flavor of fermented sausages [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 126−133.]
[24] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]
[25] TALON R, WALTER D, CHARTIER S, et al. Effect of nitrate and incubation conditions on the production of catalase and nitrate reductase by staphylococci[J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 52(1-2): 47−56.
[26] OZTURKOGLU-BUDAK S, WIEBENGA A, BRON P A, et al. Protease and lipase activities of fungal and bacterial strains derived from an artisanal raw ewe's milk cheese[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 237: 17−27.
[27] 汤兴宇, 王浩东, 吴念, 等. 食盐对传统发酵肉成熟过程中微生物菌群、理化性质及盐溶性蛋白特性的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(10): 1−7. [TANG Xingyu, WANG Haodong, WU Nian, et al. Effect of salt on microbial flora, physicochemical properties and salt-soluble protein characteristics of traditional fermented meat during fermentation[J]. Meat Research, 2020, 34(10): 1−7.]
[28] 许女, 李雅茹, 王超宇, 等. 传统发酵食品中乳酸菌的抗生素耐药性评估及耐药基因分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(7): 160−171. [XU Nü, LI Yaru, WANG Chaoyu, et al. Antimicrobial resistance evaluation and resistant gene profiles of lactic acid bacteria isolated from traditional fermented foods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(7): 160−171.]
[29] ZANARDI E, GHIDINI S, BATTAGLIA A, et al. Lipolysis and lipid oxidation in fermented sausages depending on different processing conditions and different antioxidants[J]. Meat Science, 2004, 66(2): 415−423.
[30] 刘睿茜, 熊苏玥, 戚彪, 等. 植物乳植杆菌和发酵温度对半发酵羊肉干风味品质形成的影响[J]. 肉类研究, 2025, 39(7): 1−12. [LIU Ruiqian, XIONG Suyue, QI Biao, et al. Effect of lactiplantibacillus plantarum and fermentation temperature on the flavor formation of semi-fermented lamb jerky[J]. Meat Research, 2025, 39(7): 1−12.]
[31] 王雍雍, 陈磊, 魏从娇, 等. 功能菌株复配对发酵香肠抗氧化特性及风味的作用[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 149−157. [WANG Yongyong, CHEN Lei, WEI Congjiao, et al. Effect of functional multi-strain starter culture on inhibiting protein oxidation and improving flavor in fermented sausage[J]. Food Science, 2023, 44(22): 149−157.]