杨鑫, 杨娟, 黄佳豪, 等. 一株新型嗜酸乳杆菌 CCNH655 的筛选及其在糖脂代谢调控中的益生功能研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 185−192. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060343

YANG Xin, YANG Juan, HUANG Jiahao, et al. Screening and Probiotic Characterization of *Lactobacillus acidophilus* CCNH655 and Its Potential Role in Regulating Glucose and Lipid Metabolism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 185−192. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060343

· 生物工程 ·

一株新型嗜酸乳杆菌 CCNH655 的筛选及其在糖脂代谢调控中的益生功能研究

杨　鑫, 杨　娟, 黄佳豪, 陈欣怡, 郑晓卫*
（中粮营养健康研究院有限公司, 北京 102200）

摘　要: 目的：本研究旨在从新疆发酵酸驼乳中分离筛选具有优良益生特性与代谢调节功能（降血糖、降血脂）的益生菌菌株。方法：首先，采用传统微生物分离技术从新疆发酵酸驼乳中分离纯化乳酸菌；通过模拟人工胃液、胆盐耐受性、自聚集能力及疏水性检测，系统评估菌株的潜在益生特性；进一步以 *α*-葡萄糖苷酶抑制率、*α*-淀粉酶抑制率为核心指标评价菌株的体外降血糖潜力，以甘氨酸/牛磺酸胆汁盐水解酶活性及胆固醇降解率为关键参数评估菌株的体外降血脂功效；最后，通过抑菌谱测定、溶血性试验及抗生素敏感测试，综合评价候选菌株的抑菌能力与生物安全性。结果：从新疆发酵酸驼乳中成功分离获得多株乳酸菌，经初筛获得 10 株具有较强人工胃液（pH3.0）与胆盐（0.2%）耐受性的候选菌株，其中 6 株表现出优异的体外黏附能力；经复筛最终获得 1 株嗜酸乳杆菌（编号 CCNH655），该菌株同时具备较优的降血糖（*α*-葡萄糖苷酶抑制率 67.19%±5.38%、*α*-淀粉酶抑制率 86.75%±4.34%）与降血脂（甘氨酸胆汁盐水解酶活性 3.89±0.35 U/mL、胆汁盐水解酶活性 6.91±0.48 U/mL、胆固醇降解率 79.39%±4.76%）功能，且具有较广泛的抑菌谱，无溶血现象，并对 9 种抗生素呈敏感型，符合益生菌安全性评价标准。结论：嗜酸乳杆菌 CCNH655 兼具优良的益生特性、显著的代谢调节功能及良好的生物安全性，为开发靶向改善糖脂代谢的新型功能性益生菌产品及发酵乳制品提供了重要的菌株资源与科学支撑。

关键词: 嗜酸乳杆菌, 益生特性, 降血糖, 降胆固醇, 安全性
中图分类号: TS201.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0185−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060343
本文网刊:

Screening and Probiotic Characterization of *Lactobacillus acidophilus* CCNH655 and Its Potential Role in Regulating Glucose and Lipid Metabolism

YANG Xin, YANG Juan, HUANG Jiahao, CHEN Xinyi, ZHENG Xiaowei*
(Nutrition & Health Research Institute, COFCO Corporation, Beijing 102200, China)

Abstract: Objective: This study aimed to isolate and screen probiotic strains with excellent probiotic properties and metabolic regulatory functions (hypoglycemic and hypocholesterolemic activities) from fermented camel milk in Xinjiang. Methods: Firstly, lactic acid bacteria were isolated and purified from Xinjiang fermented camel milk using traditional microbial isolation techniques. Their potential probiotic properties were systematically evaluated via assays of simulated artificial gastric juice tolerance, bile salt tolerance, auto-aggregation ability, and hydrophobicity. Furthermore, the *in vitro* hypoglycemic potential was assessed using *α*-glucosidase inhibition rate and *α*-amylase inhibition rate as core indicators, while the *in vitro* hypocholesterolemic efficacy was evaluated based on key parameters including glycine/taurine bile salt hydrolase activity and cholesterol degradation rate. Finally, the antibacterial ability and biological safety of the candidate strain

收稿日期: 2025−06−26
基金项目: 中粮集团战略前瞻项目（（011）2024-C1-F002*）。
作者简介: 杨鑫（1991−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能微生物筛选, E-mail: yangxin1@cofco.com。
*** 通信作者:** 郑晓卫（1981−）, 女, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 微生物应用研究, E-mail: zhengxiaowei@cofco.com。

was comprehensively evaluated through antibacterial spectrum determination, hemolysis test, and antibiotic sensitivity test. Results: A total of multiple lactic acid bacteria strains were successfully isolated from the fermented camel milk. After primary screening, 10 candidate strains with strong tolerance to simulated artificial gastric juice (pH3.0) and bile salts (0.2%) were obtained, among which 6 strains exhibited excellent *in vitro* adhesion ability. Through secondary screening, one *Lactobacillus acidophilus* strain (designated CCNH655) was ultimately selected. This strain simultaneously displayed superior hypoglycemic activity (as indicated by α-glucosidase inhibition rate 67.19%±5.38% and α-amylase inhibition rate 86.75%±4.34%) and hypocholesterolemic efficacy (reflected by glycine bile salt hydrolase activity 3.89±0.35 U/mL, taurine bile salt hydrolase activity 6.91±0.48 U/mL, and cholesterol degradation rate 79.39%±4.76%) functions. Additionally, it showed a relatively broad antibacterial spectrum, no hemolytic activity, and sensitivity to 9 antibiotics, thus meeting the safety evaluation standards for probiotics. Conclusion: *L. acidophilus* CCNH655 possesses excellent probiotic properties, significant metabolic regulatory functions, and favorable biological safety. It provides an important strain resource and scientific support for the development of novel functional probiotic products and fermented dairy products targeting the improvement of glucose and lipid metabolism.

Key words: *Lactobacillus acidophilus*; probiotic properties; hypoglycemic; hypocholesterolemic; safety

随着现代生活方式的转变,高热量饮食、久坐少动、缺乏运动等不良习惯日益普遍,导致代谢综合征(Metabolic Syndrome, MetS)的发病率显著上升,已成为威胁公共健康的重要问题。代谢综合征是一种复杂的糖脂代谢紊乱状态,其典型特征包括向心性肥胖、全身性高血压、胰岛素抵抗以及动脉粥样硬化性血脂异常[1−2]。这一系列代谢异常不仅影响个体的生活质量,更增加了心血管疾病、2 型糖尿病等慢性病的发生风险,对公共卫生体系构成严峻挑战。因此,探索有效的预防和干预策略,尤其是基于天然食物或其成分的方案,对于应对代谢综合征的流行具有重要意义。

在众多天然食物及其成分中,富含益生菌的发酵乳制品,如开菲尔酸奶,正显示出其在改善代谢健康方面的潜力。研究表明,开菲尔酸奶具有显著的降血脂、降血糖功能,能够有效降低高脂饮食小鼠血清中的甘油三酯和总胆固醇含量,并显著抑制四氧嘧啶诱导的血糖升高[3]。益生菌可通过促进葡萄糖代谢、转化胆固醇、抑制糖脂吸收等多种机制,有效改善糖脂代谢紊乱[4]。益生菌已被建议作为一种预防 2 型糖尿病的潜在策略,例如通过抑制 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶活性,延缓碳水化合物消化吸收,稳定血糖水平,对糖尿病、高血脂及肥胖症均有积极作用[5−6]。大量研究证据支持益生菌的这些益处,例如,鼠李糖乳杆菌 GG(LGG)能改善糖尿病大鼠的糖化血红蛋白水平和胰岛素反应[7];副干酪乳杆菌 TD062 和 L14 分别展现出良好的降血糖及改善脂质代谢、氧化应激的能力[8−9]。此外,益生菌改善胆固醇水平的机制多样,包括直接吸收、产生抑制吸收的代谢产物、胆汁盐水解酶活性以及调节肠道菌群平衡等[10−13]。这些发现为利用益生菌及其发酵产品作为干预代谢综合征的有效手段提供了坚实的科学依据。

本研究从新疆发酵驼乳中分离纯乳酸菌,依据其耐人工胃液、胆盐及体外黏附特性进行筛选,在此基础上,进一步评估候选菌株的降血糖、降血脂能力,最终获得一株嗜酸乳杆菌 CCNH655。对该菌株的抑菌性能及安全性进行测定,以期筛选出一株具有改善高血糖、高血脂等代谢性疾病潜力的功能性益生菌,为开发相关预防和治疗产品奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

菌株来源 本实验室从新疆发酵酸驼乳分离菌株;质控菌株:大肠杆菌(ATCC25922、CICC10421)、金黄色葡萄球菌(CMCC26001、CMCC26003)、沙门氏菌(ATCC14028、CVCC3378)、白色念珠菌(CICC-1965、ATCC10231) ATCC 编号菌株采购自美国典型培养物保藏中心,CICC 编号菌株采购自中国工业微生物保藏管理中心,CMCC 编号菌株采购自中国医学细菌保藏管理中心,CVCC 编号菌株采购自国家兽医微生物(毒)种保藏中心;MRS 培养基、LB 培养基、胆盐 Oxoid;无菌脱纤维绵羊血、哥伦比亚血琼脂平板、万古霉素、硫酸庆大霉素、硫酸链霉素、盐酸克林霉素、盐酸四环素、红霉素、氨苄青霉素、卡那霉素、氯霉素、PBS 缓冲液(0.1 mol/L,pH6.8) 均为分析纯,北京索莱宝科技有限公司;十二烷、硝基苯基-β-D-葡萄糖苷、α-葡萄糖苷酶(50 U/mg)、碳酸钠、α-淀粉酶(4000 U/g)、可溶性淀粉、碘液、甘氨胆酸钠、牛磺胆酸钠、胆固醇、蔗糖酯、吐温 80、无水乙醇 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;氨基酸检测试剂盒(ml095002)、胆固醇检测试剂盒(TC-W48-N(1031) 上海酶联生物科技有限公司。

Multifuge X4R Pro 台式离心机、IMH100-SS 恒温培养箱 赛默飞世尔科技(中国)有限公司;移液器 德国 Eppendorf 公司;Costar 96 孔细胞培养板(3599) 康宁股份有限公司;ZQZY-CF9.9 恒温振荡摇床 上海知楚仪器有限公司;生物安全柜 ESCO;SQ810C 立式压力蒸汽灭菌锅 重庆雅马拓科技有限公司;QPIX 450 单克隆挑取机器人 美谷分子仪器(上海)有限公司;DG250 厌氧工作站 唐惠特利科学有限公司;ME104 型万分之一天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　发酵乳中益生菌的分离筛选　将采集的新鲜新疆发酵酸驼乳用无菌生理盐水逐级稀释, 分别吸取 100 μL 不同稀释梯度的稀释液涂布于 MRS 固体平板上, 置于 37 ℃ 厌氧培养箱中培养 48 h, 用 QPIX 450 挑取单菌落接种于 MRS 液体培养基中, 培养过夜, 并添加甘油(终浓度 25%), −80 ℃ 冻存。

1.2.2　益生菌潜在益生特性研究

1.2.2.1　菌株活化　将−80 ℃ 冷冻保存的益生菌菌株按照 0.2% 的接种比例接种于新鲜 MRS 液体培养基, 37 ℃ 培养过夜, 传代 2~3 次, 4 ℃ 保存, 待用。

1.2.2.2　人工模拟胃液、胆盐的配制　人工模拟胃液[14−15]: 参照《益生菌剂胃液耐受性检测方法》T/CHHFA435-2024 标准制备人工模拟胃液, 现配现用。胆盐: 称取 0.2 g 胆盐, 定容至 100 mL, 121 ℃ 高压灭菌 15 min。

1.2.2.3　菌株耐受性测定　人工胃液耐受性[14]: 将培养过夜的菌液用生理盐水洗涤两次后, 进行梯度稀释, 测定初始活菌数总数(N), 每组设 3 个平行样; 将洗涤后重悬的菌液与等体积的人工模拟胃液混合, 于 37 ℃ 水浴 3 h 后, 梯度稀释并测定处理后活菌数(N′)。采用平板计数法测定活菌数, 耐胃酸存活率计算如式(1)所示:

$$\text{耐胃酸存活率}(\%)=\left(\frac{N_1'\times 2}{N_1}+\frac{N_2'\times 2}{N_2}+\frac{N_3'\times 2}{N_3}\right)\times\frac{1}{3}\times 100 \quad \text{式（1）}$$

式中: N_1、N_2、N_3 为三次胃液耐受性检测初始活菌数总数, CFU/mL; N'_1、N'_2、N'_3 为三次胃液耐受性检测处理后活菌数总数, CFU/mL。

胆盐耐受性[16−17]: 将培养过夜的菌液用生理盐水洗涤两次后, 进行梯度稀释, 测定初始活菌数总数(N), 每组设 3 个平行样; 将洗涤后重悬的菌液, 与等体积的胆盐溶液混合, 于 37 ℃ 水浴 3 h 后, 梯度稀释并测定处理后活菌数(N′)。采用平板计数法测定活菌数, 耐胆盐存活率计算如式(2)所示:

$$\text{耐胆盐存活率}(\%)=\left(\frac{N_1'\times 2}{N_1}+\frac{N_2'\times 2}{N_2}+\frac{N_3'\times 2}{N_3}\right)\times\frac{1}{3}\times 100 \quad \text{式（2）}$$

式中: N_1、N_2、N_3 为三次胆盐耐受性检测初始活菌数总数, CFU/mL; N'_1、N'_2、N'_3 为三次胆盐耐受性检测处理后活菌数总数, CFU/mL。

1.2.2.4　自聚集性测定　培养过夜的菌液用生理盐水洗涤 2 次后, 重悬使其 OD_{600}=1, 吸取 100 μL 菌液至酶标板中, 检测初始 OD_{600} 值, 记为 A_0; 而后将菌液静置 4 h, 取上层菌液 100 μL 至酶标板, 检测其静置后 OD_{600} 值, 记为 A_1[18], 计算如式(3)所示:

$$\text{菌株自聚集率}(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100 \quad \text{式（3）}$$

式中: A_1: 样品处理后 OD_{600} 值; A_0: 样品初始 OD_{600} 值。

1.2.2.5　疏水性测定　吸取上述 OD_{600}=1 的重悬菌液 100 μL 至酶标板中, 检测初始 OD_{600} 值, 记为 A_0; 而后吸取菌液 900 μL, 加入 180 μL 十二烷旋涡振荡, 静置 20 min, 取下层水相测其 OD_{600} 值, 记为 A_1[19−20], 计算如式(4)所示:

$$\text{疏水率}(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中: A_1: 样品处理后 OD_{600} 值; A_0: 样品初始 OD_{600} 值。

1.2.3　益生菌降血糖能力测定

1.2.3.1　α-葡萄糖苷酶活性抑制率　参照李璇[21]、张军蒙[22] 的方法并加以调整。96 孔酶标板中加入 25 μL 0.1 mol/L PBS 缓冲液(pH6.8), 25 μL 20 mmol/L 硝基苯基-β-D-葡萄糖苷和 25 μL 样品, 37 ℃ 反应 10 min 后, 加入 50 μL 0.2 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶; 37 ℃ 反应 15 min 后, 加入 100 μL 0.1 mol/L 碳酸钠溶液终止反应, 于 405 nm 处检测 OD 值, 以阿卡波糖(1 μg/μL)作为阳性对照组。α-葡萄糖苷酶活性抑制率计算如式(5)所示:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶活性抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_{样品}-A_{样品对照}}{A_{空白}-A_{空白对照}}\right)\times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中: $A_{样品}$: 样品检测 OD_{405} 值; $A_{样品对照}$: 样品组 PBS 替代酶添加检测 OD_{405} 值; $A_{空白}$: PBS 检测 OD_{405} 值; $A_{空白对照}$: 空白组 PBS 替代酶添加检测 OD_{405} 值。

1.2.3.2　α-淀粉酶活性抑制率　参照刘文瑞[6]、漆莹等[23] 的方法并加以调整。96 孔酶标板中加入 25 μL 0.1 mol/L PBS 缓冲液(pH6.8), 50 μL 2 U/mL α-淀粉酶, 50 μL 1% 可溶性淀粉溶液和 25 μL 样品, 37 ℃ 反应 30 min 后, 加入 1 μL 碘液, 于 660 nm 处检测 OD 值, 以阿卡波糖(1 μg/μL)作为阳性对照组。样品的 α-淀粉酶活性抑制率计算如公式(6)所示:

$$\alpha\text{-淀粉酶活性抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_{样品}-A_{样品对照}}{A_{空白}-A_{空白对照}}\right)\times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中: $A_{样品}$: 样品检测 OD_{660} 值; $A_{样品对照}$: 样品组 PBS 替代酶添加检测 OD_{660} 值; $A_{空白}$: PBS 检测 OD_{660} 值; $A_{空白对照}$: 空白组 PBS 替代酶添加检测 OD_{660} 值。

1.2.4　益生菌降血脂能力测定

1.2.4.1　胆汁盐水解酶活性检测　参照 Shehata 等[24]、玛丽娜·库尔曼[25] 的方法并加以调整。培养过夜的菌液, 5000 r/min, 4 ℃ 离心 5 min, 收集菌泥, 用生理盐水洗涤两次, 一定体积的 0.1 mol/L PBS (pH6.8)重悬, 平均分成两份, 一份加入 10%(v/v) 200 mmol/L 甘氨胆酸钠溶液, 一份加入 10%(v/v) 200 mmol/L 牛磺胆酸钠溶液, 37 ℃ 反应 2 h, 离心

收集上清，用氨基酸检测试剂盒检测氨基酸含量，分别计算甘氨酸胆汁盐水解酶活性和牛磺酸胆汁盐水解酶活性。胆汁盐水解酶活性(U)定义：1 min 从底物释放 1 μmol 氨基酸的酶的量。

1.2.4.2 胆固醇降解能力 参照吴燕[17]、腾跃[26]的方法，配制胆固醇溶液及含胆固醇的 MRS 液体培养基，将培养过夜的菌液，按照 2% 接种量接种至上述含胆固醇的 MRS 液体培养基中，37 ℃、180 r/min 培养 24 h，空白培养基作为空白对照。用胆固醇检测试剂盒检测胆固醇含量，胆固醇降解率计算如式(7)所示：

$$胆固醇降解率(\%)=\frac{A_{空白}-A_{样品}}{A_{空白}}\times 100 \quad 式（7）$$

式中：$A_{样品}$：样品检测胆固醇含量；$A_{空白}$：空白培养基检测胆固醇含量。

1.2.5 菌株鉴定

1.2.5.1 16S rDNA 基因测序 将纯化后的单菌落，应用细菌基因组提取试剂盒提取菌株 DNA，选择细菌 16S rDNA 通用引物 27F 与 1492R，对其 V1-V9 可变区进行 PCR 扩增；PCR 扩增体系为 2×Rapid Taq Master Mix 5 μL，27F 与 1492R 引物各 1 μL，DNA 模板 1 μL，ddH_2O 2 μL。PCR 扩增条件为 95 ℃ 预变性 3 min，95 ℃ 变性 30 s，55 ℃ 退火 30 s，72 ℃ 延伸 1 min 30 s，共 34 个循环；72 ℃ 再延伸 5 min。扩增产物经纯化后，委托北京睿博兴科生物技术有限公司进行 Sanger 测序，最终获得 16S rDNA 序列。

1.2.5.2 系统发育树的构建 将测序获得的 16S rDNA 序列通过 BLAST 程序在 NCBI 数据库中进行同源性比对，并下载同源性较高的参考序列。使用 MEGA 7.0.26 软件进行系统发育分析：首先采用 Clustal W 法进行多序列比对，再基于邻接法(Neighbor-Joining, NJ)构建系统发育树。进化距离模型选用最大复合似然法(Maximum Composite Likelihood)，并以自展法(bootstrap method)进行可靠性检验，重复次数设为 1000 次。

1.2.6 嗜酸乳杆菌 CCNH655 抑菌能力测定

1.2.6.1 质控菌株的培养 将指示菌株大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌分别接种于 LB 液体培养基中，37 ℃ 培养过夜；白色念珠菌接种于 YPD 液体培养基中，30 ℃ 培养过夜；分别转接至对应新鲜培养基中，培养至 OD_{600}=1 或活菌数 10^8 CFU/mL，对应培养基稀释至 10^5 CFU/mL 作为指示菌液[27−28]。

1.2.6.2 抑菌能力测定 将嗜酸乳杆菌 CCNH655 培养过夜的菌液，12000 r/min 离心 2 min 收集上清，0.22 μm 滤膜过滤除菌，作为测试样品。其中 MRS 液体培养基作为阴性对照，氨苄青霉素或卡那霉素作为阳性对照。测试样品与指示菌液等体积混合，测定培养前后的 OD_{600} 值，抑菌率计算如公式(8)所示。

$$抑菌率(\%)=\frac{A_0-A}{A_0}\times 100 \quad 式（8）$$

式中：A_0：阴性对照样品 OD_{600} 值；A：样品 OD_{600} 值。

1.2.7 嗜酸乳杆菌 CCNH655 安全性评价

1.2.7.1 溶血试验 吸取 10 μL 过夜培养的嗜酸乳杆菌 CCNH655 接种于哥伦比亚血琼脂平板，其中大肠杆菌作为阴性对照、金黄色葡萄球菌作为阳性对照菌株(每株菌做 3 个重复)，37 ℃ 培养 48 h，观察溶血情况[18]。

1.2.7.2 抗生素敏感检测 依据 T/CIFST009-2022《食品用益生菌通则》对氨苄青霉素、万古霉素、庆大霉素、卡那霉素、链霉素、红霉素、克林霉素、四环素、氯霉素 9 种抗生素的最小抑菌浓度进行检测。抗生素母液的配制浓度：氨苄青霉素：16 μg/mL；万古霉素：128 μg/mL；庆大霉素：256 μg/mL；卡那霉素：1024 μg/mL；链霉素：256 μg/mL；红霉素：8 μg/mL；克林霉素：16 μg/mL；四环素：64 μg/mL；氯霉素：64 μg/mL，以 MRS 作为稀释液，采用二倍稀释法，配制不同浓度的抗生素样品[29−30]。

以 2% 的接种量将过夜培养的嗜酸乳杆菌 CCNH655 接种于新鲜 MRS 液体培养基中，37 ℃、200 r/min 培养 4 h 至 OD_{600}=1，活菌数约为 1.5×10^8 CFU/mL；稀释 1000 倍，与不同浓度的抗生素溶液等体积混合置于 96 孔细胞培养板中，37 ℃ 培养 24 h，检测培养前后 OD_{600}。其中 MRS 液体培养基作为空白对照。菌株完全被抑制的浓度为最小抑菌浓度(MIC)，将 MIC 值与《食品用益生菌通则》(T/CIFST 009-2022)中折点值进行比对，判断该菌株的抗生素敏感性。

1.3 数据处理

实验数据均基于 3 次独立重复的平均值，以“平均值±标准差”(Mean±SD)表示。采用 GraphPad Prism 软件进行数据处理与统计分析，系统发育树利用 MEGA 7.0.26 软件构建。

2 结果与分析

2.1 分离菌株对人工胃液、胆盐的耐受性

分离菌株分别经人工胃液(pH3.0)处理 3 h，0.2% 胆盐处理 3 h，耐受存活率前 20 菌株结果见表 1。根据耐胃酸和耐胆盐存活率的组间显著性分析(Kruskal-Wallis H 检验)，综合评估各菌株的性能水平，20 株候选菌株的耐胃酸、耐胆盐存活率存在显著差异(P<0.05)，通过 Dunn's 多重比较分析(FDR 校正)，菌株被划分为不同显著性组(a、ab、b、abc、bc、c、cd、d、e、f、g)。本研究采用“存活率+显著性分组”双重标准进行筛选，优选耐胃酸存活率>68%，耐胆盐存活率>50% 或属于 c 及以上组别的菌株，最终，从 20 株菌株中筛选出 10 株耐胃酸、耐胆盐性能较强的

表 1　20 株益生菌人工胃液、胆盐耐受性

Table 1　Tolerance of 20 probiotic strains to artificial gastric juice and bile salts

菌株编号	耐胃酸存活率(%)	耐胆盐存活率(%)
MRS1	86.19±5.50^{abc}	51.28±2.74^{bc}
MRS2	92.94±3.78^{ab}	44.96±2.57^{c}
MRS3	50.00±1.86^{d}	9.38±0.32^{e}
MRS4	95.88±2.99^{a}	50.89±1.76^{bc}
MRS5	31.25±1.20^{e}	24.31±0.58^{d}
MRS6	97.27±4.02^{a}	26.05±1.17^{d}
MRS7	1.37±0.04^{g}	38.92±1.51^{cd}
MRS8	9.28±0.32^{f}	25.61±0.61^{d}
MRS9	77.53±3.69^{bc}	50.64±2.32^{bc}
MRS10	88.00±2.93^{abc}	50.07±2.48^{bc}
MRS11	91.67±3.89^{ab}	17.82±0.21^{d}
MRS12	75.26±2.64^{bc}	50.00±1.77^{bc}
MRS13	60.00±2.85^{cd}	31.25±1.53^{cd}
MRS14	95.48±4.65^{a}	75.21±3.23^{a}
MRS15	73.33±1.95^{c}	52.33±1.21^{b}
MRS16	68.38±2.56^{c}	34.13±0.37^{cd}
MRS17	82.50±2.52^{bc}	56.85±2.55^{b}
MRS18	61.11±2.99^{cd}	9.90±0.48^{e}
MRS19	86.42±3.54^{abc}	51.37±1.18^{bc}
MRS20	76.29±1.71^{bc}	9.28±0.11^{e}

注：同列不同小写字母表示组间存在显著性差异（P<0.05），表2~表4同。

菌株，用于后续功能评价，编号分别为 MRS1、MRS2、MRS4、MRS9、MRS10、MRS12、MRS14、MRS15、MRS17、MRS19。乳酸菌在肠道中定植的首要条件即耐胃酸、耐胆盐，人体胃酸环境（pH3.0）和小肠高胆盐环境（胆盐 0.1%~0.3%（w/v））会对部分乳酸菌的活性及代谢能力产生抑制，乳酸菌以较高活性及活菌数到达小肠中则有利于其定植[31]。王睿敏等[32] 以 41 株乳酸菌作为研究对象，筛选具有潜在降压功能的菌株，其中 4 株乳酸菌在 pH2.0~3.0 的模拟胃酸环境中，存活率均大于 65%，胆盐浓度在 0~0.1% 范围内，具有较好的耐受性。相较于已报道菌株，本研究获得的 10 株候选菌株在模拟胃肠条件下（pH3.0 人工胃液处理 3 h，0.2% 胆盐处理 3 h）均展现出更高的存活率，表明其具有更优良的耐酸性和耐胆盐性能，具备良好的应用潜力。

2.2　候选菌株体外黏附能力

在益生菌筛选研究中，自聚集性和表面疏水性常被作为评估乳酸菌黏附性能的关键指标，广泛应用于体外功能评价体系[33]。菌株在快速繁殖期会出现自聚集性，且与菌株的黏附能力呈正相关；细菌高疏水性能够有助于细菌与肠黏膜相黏附，因此细菌疏水性越高，其黏附能力也越强[34]。为评估菌株的体外黏附潜力，本研究测定了其自聚集性及表面疏水性，结果见表 2。

根据自聚集性和疏水性的多组比较分析（Kruskal-Wallis H 检验），综合评估各菌株的功能特性水平，10 株候选菌株的自聚集性、疏水性存在显著差异（P<0.05），通过 Dunn's 多重比较分析（FDR 校正），菌株被划分为不同显著性组（a、b、c、d）。本研究采用“体外黏附能力+显著性分组”双重标准进行筛选，优选自聚集性、疏水性均>30% 或属于 b 及以上组别的菌株，最终，从 10 株菌株中筛选出 4 株菌株用于后续功能评价，编号分别为 MRS2、MRS4、MRS14、MRS19。4 株候选菌株相较于其他候选菌株表现出更优的体外黏附能力，表明其具备较强的肠道定植能力，具有成为潜在益生菌的应用前景。

表 2　候选菌株体外黏附能力评价结果

Table 2　Evaluation results of *in vitro* adhesion ability of candidate strains

菌株编号	自聚集性(%)	疏水性(%)
MRS1	6.37±0.32^{c}	6.83±0.62^{e}
MRS2	49.08±4.32^{a}	32.19±1.61^{b}
MRS4	54.37±3.26^{a}	39.69±3.93^{b}
MRS9	35.18±2.46^{b}	19.05±2.00^{c}
MRS10	39.13±3.88^{b}	18.13±1.27^{c}
MRS12	1.75±0.12^{c}	11.02±0.88^{d}
MRS14	59.41±4.16^{a}	50.21±2.51^{a}
MRS15	1.89±0.18^{c}	6.76±0.41^{e}
MRS17	8.90±0.71^{c}	12.67±1.14^{d}
MRS19	49.87±2.50^{a}	58.46±4.68^{a}

2.3　益生菌降血糖能力

本研究通过 PNPG 法测定 4 株候选菌株的 α-葡萄糖苷酶抑制率，同时测定其 α-淀粉酶抑制率，综合评价候选菌株的降血糖能力，结果见表 3。不同菌株 α-葡萄糖苷酶抑制率、α-淀粉酶抑制率之间差异采用 Kruskal-Wallis H 检验，随后进行 Dunn's 多重比较（FDR 校正），4 株候选菌株均具有较强的 α-葡萄糖苷酶抑制率，其中 MRS2、MRS14、MRS19 具有较强的 α-淀粉酶抑制率。MRS2 的 α-葡萄糖苷酶抑制率最低，仅有 65.28%±4.57%，MRS4 的 α-淀粉酶抑制率最低，仅有 75.34%±6.78%。MRS14 的降血糖能力最强，α-葡萄糖苷酶抑制率达 67.19%±5.38%，α-淀粉酶抑制率达 86.75%±4.34%。

表 3　候选菌株降血糖能力评价

Table 3　Hypoglycemic ability evaluation of candidate strains

菌株编号	α-葡萄糖苷酶抑制率(%)	α-淀粉酶抑制率(%)
MRS2	65.28±4.57^{a}	85.19±6.82^{ab}
MRS4	65.89±3.29^{a}	75.34±6.78^{b}
MRS14	67.19±5.38^{a}	86.75±4.34^{a}
MRS19	66.58±5.99^{a}	77.15±5.40^{ab}

大量研究表明，益生菌的降血糖、抗氧化能力对治疗人类 2 型糖尿病有有益作用。李曼等[35] 从母乳中筛选具有降血糖能力的益生菌，评价纯化菌株对 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶具有抑制作用的菌株，其中植物乳杆菌 R15 具有最优降血糖能力，α-葡萄糖苷酶抑制率达 12.73%，α-淀粉酶抑制率达 88%。Huligere 等[36] 从发酵面团中分离出 24 株益生菌，其中 7 株菌株进行抑制碳水化合物水解酶 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶的能力评价，α-葡萄糖苷酶抑制率范围

为 15.08%~59.55%，而 α-淀粉酶抑制率范围为 18.79%~63.42%，这些菌株可能具有抗糖尿病特性。综合本研究结果与已有报道可知，MRS2、MRS14、MRS19 对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制率相较其他候选菌株性能更优，且其 α-葡萄糖苷酶抑制率优于 Huligere 等[36]分离菌株的最高抑制率（59.55%），α-淀粉酶抑制率亦接近李曼等[35]筛选的植物乳杆菌 R15 的最优水平（88%），进一步证实 MRS2、MRS14、MRS19 具备降血糖功能的潜力，有望成为辅助改善 2 型糖尿病的潜在益生菌菌株。

2.4 益生菌降血脂能力

筛选降解胆固醇益生菌菌株的相关研究显示，其降胆固醇机制主要为菌体吸收结合胆固醇或代谢产物，以及分泌胆汁盐水解酶、胞外多糖等代谢产物降解胆固醇。研究者从发酵蔬菜、老坛子泡菜等样品中筛选出多株高效降胆固醇益生菌株，展现出良好的开发应用潜力[37−39]。筛选降胆固醇菌株，以“双高酶活性（甘氨酸、牛磺酸胆汁盐水解酶）+高胆固醇降解率”为核心，优先选取三个指标均优的菌株。如表 4 所示，对 4 株菌株的甘氨酸、牛磺酸胆汁盐水解酶活性及胆固醇降解率的差异进行 Kruskal-Wallis H 检验，随后采用 Dunn’s 多重比较法（经 FDR 校正）进行两两比较。结果显示，MRS14 在各项指标上的酶活性及胆固醇降解率均高于其他 3 株菌株，表现出明显优势。其甘氨酸胆汁盐水解酶活性达 3.89±0.35 U/mL，牛磺酸胆汁盐水解酶活性达 6.91±0.48 U/mL，胆固醇的降解率达 79.39%±4.76%。本研究结合实验结果与文献分析表明，MRS14 在胆汁盐水解酶活性及胆固醇降解能力方面表现优异，其胆固醇降解率优于已有报道中的高效菌株（62.54%）[38]，提示其通过双功能机制参与胆固醇代谢，具有作为降血脂益生菌的应用前景。

表 4 候选菌株降胆固醇能力评价

Table 4 Hypocholesterolemic ability evaluation of candidate strains

菌株编号	甘氨酸胆汁盐水解酶活性(U/mL)	牛磺酸胆汁盐水解酶活性(U/mL)	胆固醇降解率(%)
MRS2	2.13±0.15^{b}	3.94±0.35^{b}	39.16±3.13^{b}
MRS4	1.96±0.10^{b}	4.16±0.37^{b}	47.25±4.73^{b}
MRS14	3.89±0.35^{a}	6.91±0.48^{a}	79.39±4.76^{a}
MRS19	1.27±0.11^{c}	0.52±0.03^{c}	19.73±1.58^{c}

2.5 益生菌菌株鉴定

MRS14 菌株在肠道耐受性、体外黏附能力及代谢调控功能（降血糖、降血脂）方面均具有一定的优势，具备作为预防代谢性疾病方面具有潜在的应用价值。对 MRS14 进行 16S rDNA 序列测序，数据在 NCBI 数据库进行同源序列 BLAST 比对，用 MEGA 7.0.26 软件绘制菌株 MRS14 基因序列相关菌株的系统发育树，结果见图 1。菌株 MRS14 与 *Lactobacillus acidophilus* strain GR101、*L. acidophilus* strain VPI6032、*L. acidophilus* strain LA1 聚在一个分支上，确认该菌株为嗜酸乳杆菌（*L. acidophilus*），并命名为 CCNH655。

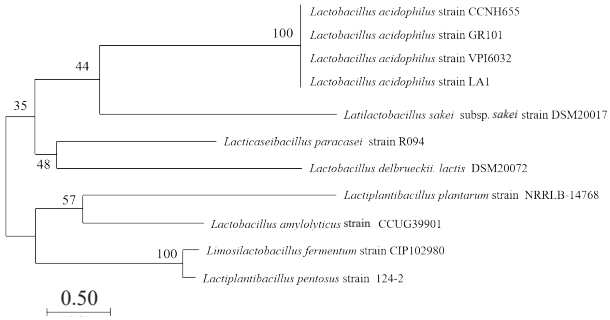


图 1 嗜酸乳杆菌 CCNH655 16S rDNA 序列系统发育树

Fig.1 16S rDNA sequence phylogenetic tree of *L. acidophilus* CCNH655

2.6 嗜酸乳杆菌 CCNH655 抑菌能力

检测嗜酸乳杆菌 CCNH655 对常见条件致病菌，革兰氏阳性细菌：金黄色葡萄球菌，革兰氏阴性细菌：大肠杆菌、沙门氏菌的抑制能力，真菌：白色念珠菌的抑制能力，结果见表 5。从表 5 中可以看出，嗜酸乳杆菌 CCNH655 具有广泛的抑菌谱，对革兰氏阴性细菌大肠杆菌的抑菌能力优于革兰氏阳性细菌金黄色葡萄球菌，并对沙门氏菌、白色念珠菌具有一定的抑制能力。

2.7 嗜酸乳杆菌 CCNH655 安全性评价

2.7.1 溶血试验结果 嗜酸乳杆菌 CCNH655 未出现透明圈，与阴性对照菌大肠杆菌效果相似，与阳性对照菌金黄色葡萄球菌有显著差异。图 2 结果表明，嗜酸乳杆菌 CCNH655 没有引起溶血现象且呈阴性。

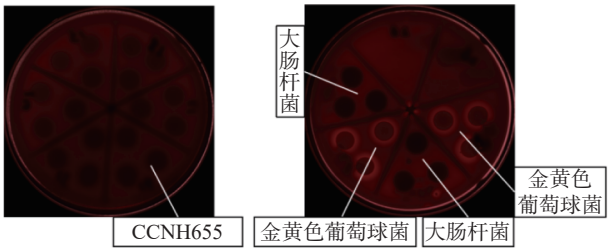


图 2 嗜酸乳杆菌 CCNH655 溶血情况

Fig.2 Hemolysis of *L. acidophilus* CCNH655

表 5 嗜酸乳杆菌 CCNH655 对不同条件致病菌的抑菌结果

Table 5 Inhibitory effects of *L. acidophilus* CCNH655 against different opportunistic pathogens

条件致病菌	大肠杆菌		金黄色葡萄球菌		沙门氏菌		白色念珠菌	
	ATCC25922	CICC10421	CMCC26001	CMCC26003	ATCC14028	CVCC3378	CICC1965	ATCC10231
抑菌率(%)	92.42±2.77	86.33±0.95	89.97±2.11	70.50±1.33	58.91±2.23	64.35±2.18	9.41±0.52	7.35±0.11

2.7.2　抗生素敏感性测定结果　由表 6 可知，嗜酸乳杆菌 CCNH655 对万古霉素、庆大霉素、链霉素、克林霉素、四环素、红霉素、氯霉素、氨苄青霉素、卡那霉素 9 种抗生素敏感。根据《食品用益生菌通则》中益生菌菌株对抗生素耐药性安全评价标准，结果表明嗜酸乳杆菌 CCNH655 是安全的，可作为益生菌应用于食品行业。

表 6　嗜酸乳杆菌 CCNH655 抗生素敏感测定结果
Table 6　Antibiotic susceptibility results of *L. acidophilus* CCNH655

序号	抗生素种类	抗生素母液浓度（μg/mL）	最小抑菌浓度（MIC，μg/mL）	判断浓度（μg/mL）
1	万古霉素	128	0.5	2
2	庆大霉素	256	16	16
3	链霉素	256	2	16
4	克林霉素	16	4	4
5	四环素	64	4	4
6	红霉素	8	0.5	1
7	氯霉素	64	4	4
8	氨苄青霉素	16	1	1
9	卡那霉素	1024	64	64

3　结论

将新疆发酵酸驼乳中分离的菌株开展耐人工胃液、耐胆盐性能评价，将耐受性前 20 的菌株中，同时耐受人工胃液、耐胆盐的 10 株菌株开展体外黏附能力测定，其中 4 株候选菌株具有较强的自聚集性和疏水性。进一步开展降血糖、降血脂能力测定，MRS14 菌株的总体性能最优，其 α-葡萄糖苷酶抑制率达 67.19%±5.38%，α-淀粉酶抑制率达 86.75%±4.34%；甘氨酸胆汁盐水解酶活性达 3.89±0.35 U/mL，牛磺酸胆汁盐水解酶活性达 6.91±0.48 U/mL，胆固醇的降解率达 79.39%±4.76%。经 16S rDNA 基因测序鉴定，该菌株为嗜酸乳杆菌，并编号为 CCNH655。嗜酸乳杆菌 CCNH655 具有广泛的抑菌谱，该菌株对革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌均具有较强的一致作用，且对白色念珠菌表现出一定的抑制活性。经溶血试验和抗生素敏感性检测，该菌株未产生溶血圈，且对万古霉素、庆大霉素、链霉素、克林霉素、四环素、红霉素、氯霉素、氨苄青霉素和卡那霉素 9 种抗生素均表现为敏感，未见耐药性。综合表明该菌株具有良好的安全性，具备作为食品级菌株用于食品开发与应用的潜力。综合体外降血糖与降血脂功能评价结果，嗜酸乳杆菌 CCNH655 表现出良好的糖脂代谢调节活性，是一株具备显著开发潜力的功能性益生菌菌株。其在干预 2 型糖尿病、高脂血症等代谢性疾病方面展现出应用前景，可作为功能性益生菌产品及乳制品开发的候选菌株，在代谢性疾病防控领域具有深入研究价值与广阔的应用转化空间。

© 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] McCRACKEN E, MONAGHAN M, SREENIVASAN S. Pathophysiology of the metabolic syndrome[J]. Clinics in Dermatology, 2018, 36(1): 14−20.

[2] SAKLAYEN M G. The global epidemic of the metabolic syndrome[J]. Current Hypertension Reports, 2018, 20(2): 12.

[3] 姜岩. 开菲尔粒增殖工艺及其发酵乳制品生理功能特殊性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2001. [JIANG Yan. Study on proliferation technology of kefir grains and the physiological function characteristic of its fermented dairy product[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2001.]

[4] 蒋同, 李龙岩, 张菊梅, 等. 功能益生菌对代谢综合征的治疗作用及其机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 233−243. [JIANG Tong, LI Longyan, ZHANG Jumei, et al. Research progress on the therapeutic effect and mechanism of functional probiotics on metabolic syndrome[J]. Food Science, 2023, 44(11): 233−243.]

[5] 曾珠, 陈艳玲, 陈尚武. 具有 α-葡萄糖苷酶抑制活性的益生乳酸菌筛选[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 349−356. [ZENG Zhu, CHEN Yanling, CHEN Shangwu. Screening for potential probiotic lactic acid bacteria strains based on α-glucosidase inhibitory activity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 349−356.]

[6] 刘文瑞. 产 α-淀粉酶抑制剂乳酸菌的筛选及活性成分纯化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. [LIU Wenrui. Screening of lactic acid bacteria producing α-amylase inhibitor and purification of active components[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]

[7] TABUCHI M, OZAKI M, TAMURA A, et al. Antidiabetic effect of *Lactobacillus* GG in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2003, 67(6): 1421−1424.

[8] DANG Fangfang, JIANG Yujun, PAN Ruili, et al. Administration of *Lactobacillus paracasei* ameliorates type 2 diabetes in mice[J]. Food & Function, 2018, 9(7): 3630−3639.

[9] ZENG Zhu, YANG Yi, ZHONG Xinxin, et al. Ameliorative effects of *Lactobacillus paracasei* L14 on oxidative stress and gut microbiota in type 2 diabetes mellitus rats[J]. Antioxidants, 2023, 12(8): 1515.

[10] HERNÁNDEZ-GÓMEZ J G, LÓPEZ-BONILLA A, TREJO-TAPIA G, et al. *In vitro* bile salt hydrolase (BSH) activity screening of different probiotic microorganisms[J]. Foods, 2021, 10(3): 674.

[11] LIONG M T, SHAH N P. Bile salt deconjugation ability, bile salt hydrolase activity and cholesterol co-precipitation ability of lactobacilli strains[J]. International Dairy Journal, 2005, 15(4): 391−398.

[12] 李明月. *Lactobacillus casei* YBJ02 调节高血脂小鼠脂代谢功能与评价[D]. 重庆: 西南大学, 2017. [LI Mingyue. Effects of *Lactobacillus casei* YBJ02 on lipid metabolism in hyperlipidemic mice[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.]

[13] 曲天铭. 东北传统发酵食品中降胆固醇乳酸菌的筛选及降解机制的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019. [QU Tianming. Screening and degradation mechanism of cholesterol-lowering lactic acid bacteria in traditional fermented foods in Northeast China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.]

[14] 中国营养保健食品协会. 益生菌剂胃液耐受性检测方法: T/CNHFA435-2024[S]. 北京: 中国营养保健食品协会, 2024. [China Nutrition and Health Food Association. Probiotic preparation gastric juice tolerance test method: T/CNHFA435-2024[S]. Beijing: China Nutrition and Health Food Association, 2024.]

[15] VERNAZZA C L, GIBSON G R, RASTALL R A. Carbohydrate preference, acid tolerance and bile tolerance in five strains of *Bifidobacterium*[J]. Journal of Applied Microbiology, 2006, 100(4): 846−853.
[16] 舒慧萍. 猪源产生物被膜乳酸菌的筛选及生物学特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019. [SHU Huiping. Selection of lactic acid bacteria producing biofilm from swine and study on their biological characteristics[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.]
[17] 吴燕. 特色自然发酵浆水中乳酸菌的筛选、表征及应用[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [WU Yan. Screening, characterization and application of lactic acid bacteria in characteristic natural fermented Jiangshui[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
[18] 郑柳青. 鼠李糖乳杆菌 LR-ZB1107-01 的益生特性及其高密度培养的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [ZHENG Liuqing. Study on properties of *Lactobacillus rhamnosus* LR-ZB1107-01 and its high density culture[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
[19] 丁诗瑶. 乳源益生菌的筛选鉴定及其免疫调节作用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. [DING Shiyao. Study on screening and identification of probiotics isolated from milk and its immunoregulation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.]
[20] 徐珏. 吸收嘌呤核苷的乳酸菌筛选及其降血尿酸功能研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021. [XU J. Screening of lactic acid bacteria that absorb purine nucleosides and their hypouricemic function[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.]
[21] 李璇. 具有潜在降血糖活性菌株的筛选、鉴定及生物学特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [LI Xuan. Screening, identification and biological characteristics of potential hypoglycemic strains[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]
[22] 张军蒙. 具有降血糖作用益生乳酸菌的筛选及其乳品的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017. [ZHANG Junmeng. Screening of probiotic lactic acid bacteria with hypoglycemic activity and its dairy study[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017.]
[23] 漆莹, 魏晓博, 马铖, 等. 益生菌发酵枸杞汁及其体外降血糖与抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 142−151. [QI Ying, WEI Xiaobo, MA Cheng, et al. Study on probiotic fermented goji berry juice and its *in vitro* hypoglycemic and antioxidant activities[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 142−151.]
[24] SHEHATA M G, EL SOHAIMY S A, EL-SAHN M A, et al. Screening of isolated potential probiotic lactic acid bacteria for cholesterol lowering property and bile salt hydrolase activity[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2016, 61(1): 65−75.
[25] 玛丽娜·库尔曼. 降胆固醇益生菌的筛选鉴定及降血脂功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020. [MALINA·K. Screening and identification of the cholesterol-lowering probiotics and blood lipid reduction[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.]
[26] 滕跃. 降胆固醇益生菌的筛选及其改善高脂饮食小鼠脂代谢机制研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020. [TENG Yue. Screening of cholesterol-lowering probiotics and its mechanism of lipid metabolism in mice fed a high-fat diet[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.]
[27] 谢婷. 开菲尔源乳酸菌特性及其抑菌和抗生物被膜作用的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018. [XIE Ting. Study on the characteristics of lactic acid bacteria isolated from Kefir and the antibacterial and antibiofilm effects on food borne pathogens[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.]
[28] 张妍. 抗龋齿益生菌性质及其作用机制的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019. [ZHANG Yan. A study on the properties and mechanism action of anti-caries probiotics[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.]
[29] 中国食品科学技术学会. T/CIFST 009-2022 食品用益生菌通则[S]. 北京: 中国食品科学技术学会, 2022. [Chinese Institute of Food Science and Technology. T/CIFST 009-2022 General standard for probiotics in food[S]. Beijing: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022.]
[30] 吉梦馨. 具有调节肠道动力作用益生乳杆菌的筛选与评价[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [JI Mengxin. Screening and evaluation of probiotic *Lactobacillus* strains with function for regulating intestinal motility[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
[31] 秦文飞, 宋馨, 夏永军, 等. 乳酸菌在肠道定植的影响因素及研究方法[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 275−283. [QIN Wenfei, SONG Xin, XIA Yongjun, et al. Factors affecting intestinal colonization of lactic acid bacteria and research methods for it[J]. Food Science, 2021, 42(23): 275−283.]
[32] 王睿敏, 郑冬艳, 但霞, 等. 具有潜在降压功能益生乳酸菌的筛选及其特性的研究[J]. 食品科技, 2025, 50(1): 1−8. [WANG Ruimin, ZHENG Dongyan, DAN Xia, et al. Screening and characterization of probiotic lactic acid bacteria with potential antihypertensive function[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(1): 1−8.]
[33] ZAWISTOWSKA-ROJEK A, KOŚMIDER A, STĘPIEŃ K, et al. Adhesion and aggregation properties of *Lactobacillaceae* strains as protection ways against enteropathogenic bacteria[J]. Archives of Microbiology, 2022, 204(5): 285.
[34] ZHOU Yingjun, GONG Wenbing, XU Chao, et al. Probiotic assessment and antioxidant characterization of *Lactobacillus plantarum* GXL94 isolated from fermented chili[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 997940.
[35] 李曼, 赵军英, 王建宇, 等. 母乳源益生菌的筛选及其降血糖能力测定[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(5): 1−7. [LI Man, ZHAO Junying, WANG Jianyu, et al. Screening probiotics from human milk and their hypoglycemic ability determination[J]. China Food Additives, 2023, 34(5): 1−7.]
[36] HULIGERE S S, CHANDANA K V B, ALQADI T, et al. Isolation and characterization of lactic acid bacteria with potential probiotic activity and further investigation of their activity by α-amylase and α-glucosidase inhibitions of fermented batters[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1042263.
[37] 高媛, 黄芳芳, 王家旺, 等. 益生菌降胆固醇的机制及其评价策略研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 322−329. [GAO Yuan, HUANG Fangfang, WANG Jiawang, et al. Research progress on cholesterol-lowering mechanism and evaluation strategies for probiotics[J]. Food Science, 2023, 44(21): 322−329.]
[38] 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 Qiu, ZHOU Xiao, QIN Yeyou, 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.]
[39] 丁小萌, 李明星, 赵芃, 等. 一株高效降胆固醇乳酸菌的筛选与特性研究[J]. 中国微生态学杂志, 2024, 36(4): 401−407,413. [DING Xiaomeng, LI Mingxing, ZHAO Peng, et al. Screening and characterization of a strain of highly efficient cholesterol-reducing lactic acid bacteria[J]. Chinese Journal of Microecology, 2024, 36(4): 401−407,413.]