

倪纪萌, 王兰, 黄钰, 等. 乳酸杆菌发酵培养基的优化 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (10): 11-18.

Ni J M, Wang L, Huang Y, et al. Optimization of culture medium for *Lactobacillus* [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (10): 11-18.

乳酸杆菌发酵培养基的优化

倪纪萌^{1#}, 王兰^{2#}, 黄钰¹, 许思雨¹, 刘安琪¹, 杭苏琴^{1*}, 丁立人^{1*}

(1. 南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210014;

2. 海南农垦草畜产业集团有限公司, 海南 海口 570226)

摘要: 为高效突破乳酸杆菌产业化生产中规模化培养的瓶颈, 实现高效低成本的工业化发酵, 本研究以植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 为研究对象, 针对其培养基配方进行系统优化。采用单因素试验筛选适宜的碳源、氮源、缓冲盐及微量元素种类与浓度, 并利用正交试验对关键因素进行配比优化。结果: 植物乳杆菌 LY19 的最优培养基配方为糖蜜 25 g/L、酵母浸粉 20 g/L、磷酸氢二钾 2.5 g/L、硫酸镁 0.7 g/L, 在此条件下活菌数达 (9.48 ± 0.07) lg CFU/mL, 培养基原料成本约为 1.77 元/L; 约氏乳杆菌 L63 的最优培养基配方为麸皮 45 g/L、酵母浸粉 30 g/L、磷酸氢二钾 2.5 g/L、硫酸镁 1.6 g/L, 活菌数为 (9.26 ± 0.16) lg CFU/mL, 培养基原料成本约为 2.70 元/L。2 种优化培养基在显著提升菌体产量的同时, 成本较实验室成品培养基 MRS (53.33 元/L) 降低约 90%。综上, 针对菌株特性进行培养基个性化优化, 可有效解决其规模化培养难题, 为乳酸杆菌在饲料等领域的工业化应用提供了经济可行的技术基础。

关键词: 植物乳杆菌; 约氏乳杆菌; 单因素试验; 正交试验; 培养基配方优化; 成本

中图分类号: S816.7 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2026)10-0011-08

Optimization of culture medium for *Lactobacillus*

NI Jimeng^{1#}, WANG Lan^{2#}, HUANG Yu¹, XU Siyu¹, LIU Anqi¹, HANG Suqin^{1*}, DING Liren^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China;

2. Hainan Agricultural Reclamation Grassland and Livestock Industry Group Co., Ltd., Haikou 570226, China)

Abstract: To overcome the bottleneck of large-scale cultivation in the industrial production of lactobacilli and to achieve cost-effective fermentation, this study systematically optimized the culture media for *Lactobacillus plantarum* LY19 and *Lactobacillus johnsonii* L63. Single-factor experiments were first conducted to identify appropriate types and concentrations of carbon sources, nitrogen sources, buffer salts, and trace elements. Subsequently, orthogonal experiments were employed to optimize the ratios of the key components. The results showed that the optimal culture medium formula for *Lactobacillus plantarum* LY19 was molasses 25 g/L, yeast extract 20 g/L, K_2HPO_4 2.5 g/L, and $MgSO_4$ 0.7 g/L. This formulation yielded a viable cell count of (9.48 ± 0.07) lg CFU/mL at a material cost of approximately CNY 1.77 per liter. The optimal culture medium for *Lactobacillus johnsonii* L63 was bran 45 g/L, yeast extract 30 g/L, K_2HPO_4 2.5 g/L, and $MgSO_4$ 1.6 g/L, achieving a viable count of (9.26 ± 0.16) lg CFU/mL with a material cost of approximately CNY 2.70 per liter. Both optimized media significantly increased biomass production and at the same time reduce the cost by approximately 90%, compared with the laboratory-ready MRS medium (CNY 53.33 per liter). This study confirmed that tailored medium optimization based on specific strain characteristics would be an effective strategy to address large-scale cultivation challenges, providing an economically viable technical foundation for industrial application of lactobacilli in fields such as animal feed.

Keywords: *Lactobacillus plantarum*; *Lactobacillus johnsonii*; single-factor experiment; orthogonal experiment; medium optimization; cost

乳酸杆菌因其在调节胃肠道菌群、代谢产生乳酸

和小肽、抑制病原菌及增强机体免疫力等方面的多重益生功能被广泛用作益生菌制剂^[1]。在畜禽生产中, 乳酸杆菌常作为饲料添加剂发挥其益生作用, 改善动物健康和生产性能^[2]。有研究发现, 植物乳杆菌 LY19 发酵后的大豆皮粗蛋白含量显著提高, 纤维和大豆球蛋白等抗营养因子含量降低^[3]; 约氏乳杆菌 L63 发酵菜籽粕可以降低其硫代葡萄糖酸苷和植酸的含量, 提高粗蛋白和酸溶蛋白的含量^[4]。尽管乳杆菌的应用前景广阔, 但产业化推广仍受限于规模化培

收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2026-07-30

基金项目: 海南省农垦投资控股集团有限公司 2025 年科技创新“揭榜挂帅”项目“利用椰子粕日粮生产高品质鸡蛋的关键技术及应用”[HKKJ2025JBGS14]

第一作者: 倪纪萌, 女, 硕士研究生; 王兰, 女, 学士。#共同第一作者

*通信作者: 杭苏琴, 教授, 博士生导师, 研究方向为动物营养与肠道健康, E-mail: suqinhang69@njau.edu.cn; 丁立人, 实验师, 研究方向为动物营养, E-mail: dingliren@njau.edu.cn。

养效率低、生产成本高等关键瓶颈。不同菌株对培养基成分与培养条件的要求差异显著，例如：Zheng等^[5]研究表明，植物乳杆菌 UL4 在蔗糖+Nucel875 MG（氮源）的组合下达到了最高的生长量，而植物乳杆菌 RG11 在葡萄糖+FM888（氮源）的组合下生长最佳。因此，为实现高效、稳定的工业化生产，必须针对目标菌株进行培养基的个性化优化。

基于此，本研究选取课题组前期从健康猪胃肠道分离、并已证实具备良好的产酸与耐胆盐特性的 2 株优良菌种植物乳杆菌（*Lactobacillus plantarum*）LY19 与约氏乳杆菌（*Lactobacillus johnsonii*）L63 作为研究对象，通过单因素试验与正交试验，系统优化其培养基配方，明确各自适宜的碳氮源比例、缓冲盐及微量

元素需求，从而为这 2 株菌在饲料工业及其他领域的大规模应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验菌株

植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 由南京农业大学动物科技学院消化道微生物实验室自行分离自健康猪的胃肠道，均具有良好的产酸特性^[6-7]，置于甘油中-20 ℃保存。

1.2 主要培养基与试剂

本研究所使用的主要试剂名称、规格、供应厂商和对应成本详见表 1。

表 1 主要培养基与试剂

试剂名称	规格	供应厂商	成本/（元·kg ⁻¹ ）
MRS 液体培养基	分析纯	青岛高科技工业园海博生物技术有限公司	1 020.8
琼脂	分析纯	北京索莱宝科技有限公司	258
红糖	饲料级	汕头市澄海区欣盛食品厂	6.64
糖蜜	饲料级	广西甘蔗甜蜜	2.35
玉米粉	饲料级	一亩方塘 Z	3.88
麸皮	饲料级	品硕商贸有限公司	3.76
酵母浸粉	工业级	济南历下雅轩化工	80
大豆肽	食品级	陕西韵禾生物科技有限公司	60
磷酸氢二钾	分析纯	西陇科学化工	40
硫酸镁	分析纯	西陇科学化工	20

1.3 菌株活化

将保存的植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 分别取 1%接种到 MRS 液体培养基上，在 37 ℃培养箱中培养活化 24 h，再按 1%体积比将培养物接种到 MRS 液体培养基中，在 37 ℃培养箱中扩培 24 h 作为种子液备用。

1.4 碳源的优化

1.4.1 植物乳杆菌 LY19 碳源的筛选

用 30 g/L 质量浓度的红糖、糖蜜、玉米粉和麸皮作为碳源代替 MRS 培养基，设置 5 个重复，将 37 ℃培养 24 h 的种子液以 1%的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合植物乳杆菌 LY19 的最佳碳源。

1.4.2 植物乳杆菌 LY19 碳源浓度的确定

根据 1.4.1 的试验结果确定碳源种类后，设置不同的碳源浓度（15、20、25、30、35 g/L）组，每组设置 5 个重复，将 37 ℃培养 24 h 的种子液以 1%的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合植物乳杆菌 LY19

的碳源浓度。

1.4.3 约氏乳杆菌 L63 碳源的筛选

用 30 g/L 质量浓度的红糖、糖蜜、玉米粉和麸皮作为碳源代替 MRS 培养基，每种碳源设置 5 个重复，将 37 ℃培养 24 h 的种子液以 1%的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合约氏乳杆菌 L63 的最佳碳源。

1.4.4 约氏乳杆菌 L63 碳源浓度的确定

根据 1.4.3 的试验结果确定碳源种类后，设置不同的碳源浓度（20、30、40、50、60 g/L）组，每组设置 5 个重复，将 37 ℃培养 24 h 的种子液以 1%的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合约氏乳杆菌 L63 的碳源浓度。

1.5 氮源的优化

1.5.1 植物乳杆菌 LY19 氮源的筛选

用 20 g/L 质量浓度的酵母浸粉、大豆肽、黄豆粉、花生麸、氯化铵和硫酸铵作为氮源代替 MRS 培养基，每种氮源设置 5 个重复，将 37 ℃培养 24 h 的

种子液以 1% 的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃ 培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合植物乳杆菌 LY19 的最佳氮源。

1.5.2 植物乳杆菌 LY19 氮源浓度的确定

根据 1.5.1 的试验结果确定氮源种类后，设置不同的氮源浓度（10、15、20、25、30 g/L）组，每组设置 5 个重复，将 37 ℃ 培养 24 h 的种子液以 1% 的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃ 培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合植物乳杆菌 LY19 的氮源浓度。

1.5.3 约氏乳杆菌 L63 氮源的筛选

用 20 g/L 质量浓度的酵母浸粉、大豆肽、氯化铵和硫酸铵作为氮源代替 MRS 培养基，每种氮源设置 5 个重复，将 37 ℃ 培养 24 h 的种子液以 1% 的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃ 培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合约氏乳杆菌 L63 的最佳氮源。

1.5.4 约氏乳杆菌 L63 氮源浓度的确定

根据 1.5.3 的试验结果确定氮源种类后，设置不同的氮源浓度（15、20、25、30、35 g/L）组，每组设置 5 个重复，将 37 ℃ 培养 24 h 的种子液以 1% 的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃ 培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合约氏乳杆菌 L63 的氮源浓度。

1.6 缓冲盐和微量元素的优化

参考前人对乳杆菌培养基中缓冲盐^[8]和微量元素^[9]的研究，确定磷酸氢二钾和硫酸镁分别作为本试验培养基的缓冲盐和微量元素。磷酸氢二钾设置不同的离子浓度（2、2.5、3、3.5、4 g/L）组，每组设置 5 个重复；硫酸镁设置不同的离子浓度（0.7、1.0、1.3、1.6、1.9 g/L）组，每组设置 5 个重复。将 37 ℃ 培养 24 h 的种子液以 1% 的比例接种到培养基中，之后在 37 ℃ 培养箱中培养 24 h，以活菌数为指标筛选出适合植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 的缓冲盐和微量元素浓度。

1.7 乳杆菌培养基优化

采用四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交表进行优化试验，将影响菌体生物量的主要因素碳源、氮源、缓冲盐和微量元素作为影响因素进行正交试验，以得到最佳培养基配比。详见表 2、表 3。

1.8 数据统计和分析

试验数据以“平均值±标准差”表示，并用 SPSS 26.0 统计软件进行单因素方差分析。对于正交试验结果，采用极差分析法确定各因素对菌体生长的

影响主次顺序，并通过 k 值计算确定各因素的最佳水平。

表 2 植物乳杆菌 LY19 正交试验中的因素水平 g/L

因素	水平		
	1	2	3
碳源	25	30	35
氮源	15	20	25
缓冲盐	2.0	2.5	3.0
微量元素	0.4	0.7	1.0

表 3 约氏乳杆菌 L63 正交试验中的因素水平 g/L

因素	水平		
	1	2	3
碳源	45	50	55
氮源	25	30	35
缓冲盐	2.0	2.5	3.0
微量元素	1.3	1.6	1.9

2 结果与分析

2.1 碳源的优化

2.1.1 植物乳杆菌 LY19 碳源的筛选

由图 1A 可知，在以糖蜜为碳源时，植物乳杆菌 LY19 生长效果最显著，经过 24 h 培养活菌数达到 (7.02 ± 0.08) lg CFU/mL，说明适合植物乳杆菌 LY19 生长。另外同等重量下，糖蜜的单价也最低，因此确定糖蜜作为最佳碳源。

2.1.2 植物乳杆菌 LY19 糖蜜浓度的确定

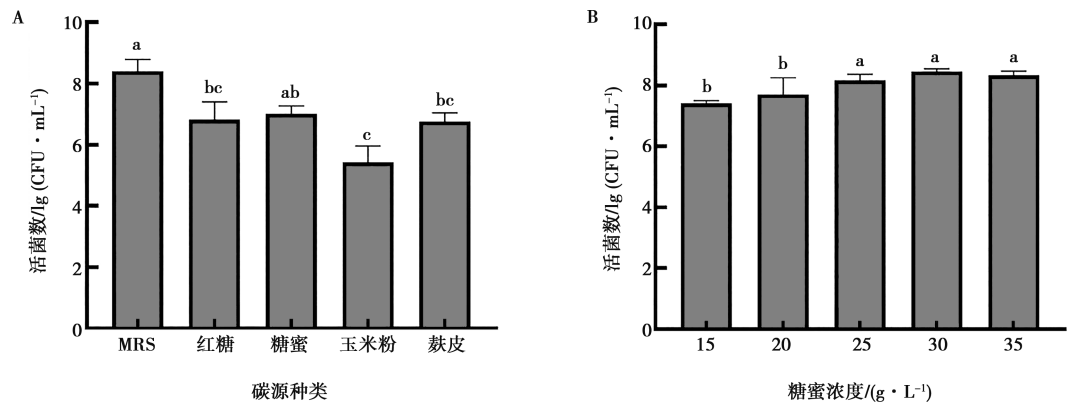
由图 1B 可知，随着糖蜜质量浓度的增加，活菌数呈先上升后下降的趋势，在质量浓度达到 30 g/L 时活菌数最高，达到 (8.46 ± 0.10) lg CFU/mL。因此最优糖蜜质量浓度应该选择 30 g/L。

2.1.3 约氏乳杆菌 L63 碳源的筛选

由图 2A 可知，在以麸皮为碳源时，约氏乳杆菌 L63 生长效果显著高于其他碳源培养基，经过 24 h 培养活菌数达到 (7.99 ± 0.11) lg CFU/mL，说明适合约氏乳杆菌 L63 生长，因此确定麸皮作为最佳碳源。

2.1.4 约氏乳杆菌 L63 麸皮浓度的确定

由图 2B 可知，随着麸皮质量浓度的增加，活菌数呈先上升后下降的趋势，在质量浓度达到 50 g/L 时活菌数最高，达到 (8.66 ± 0.09) lg CFU/mL。因此最优麸皮质量浓度应该选择 50 g/L。



注：小写字母不同表示差异显著， $P<0.05$ 。下同。

图1 不同碳源种类 (A) 及糖蜜浓度 (B) 对植物乳杆菌 LY19 的影响

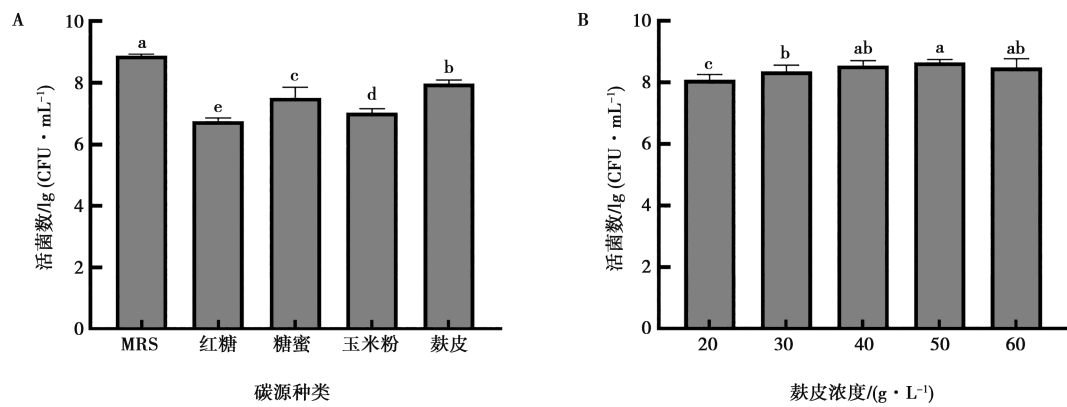


图2 不同碳源种类 (A) 及麸皮浓度 (B) 对约氏乳杆菌 L63 的影响

2.2 氮源的优化

2.2.1 植物乳杆菌 LY19 氮源的筛选

由图 3A 可知，在以酵母浸粉为氮源时，植物乳杆菌 LY19 生长效果显著，经过 24 h 培养活菌数达到 (9.76 ± 0.50) lg CFU/mL，说明适合植物乳杆菌 LY19 生长。虽然以大豆肽为氮源培养植物乳杆菌的效果和以酵母浸粉为氮源培养植物乳杆菌的效果没有显著差异，但是考虑到成本问题，同等重量下，酵母

浸粉的单价更低，因此最终确定酵母浸粉作为最佳氮源。

2.2.2 植物乳杆菌 LY19 酵母浸粉浓度的确定

由图 3B 可知，随着酵母浸粉质量浓度的增加，活菌数呈先上升后下降的趋势，在质量浓度达到 20 g/L 时活菌数最高，达到 (8.80 ± 0.15) lg CFU/mL。因此最优酵母浸粉质量浓度应该选择 20 g/L。

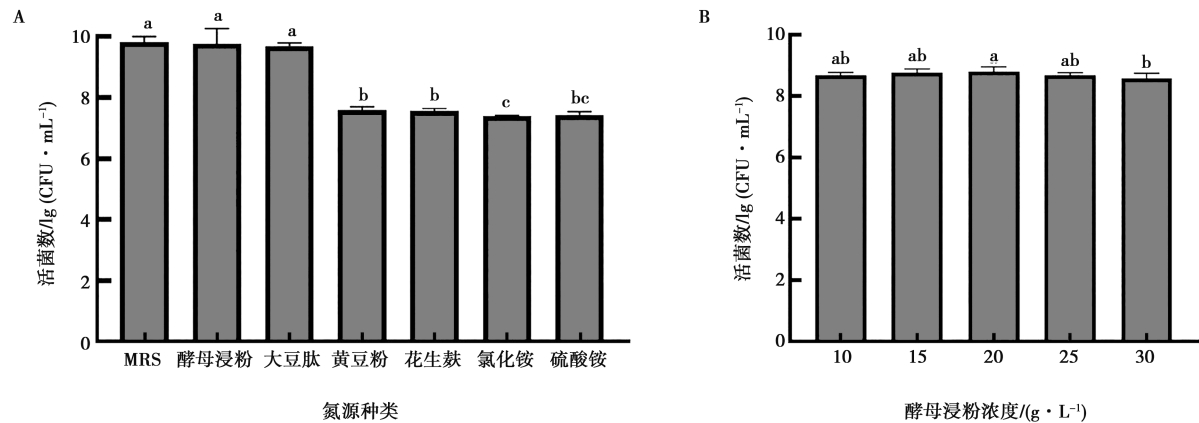


图3 不同氮源种类 (A) 及酵母浸粉浓度 (B) 对植物乳杆菌 LY19 的影响

2.2.3 约氏乳杆菌 L63 氮源的筛选

由图 4A 可知，在以酵母浸粉为氮源时，约氏乳杆菌 L63 生长效果显著，经过 24 h 培养活菌数达到 (8.30 ± 0.18) lg CFU/mL，说明适合约氏乳杆菌 L63 生长。虽然以大豆肽为氮源培养约氏乳杆菌的效果和以酵母浸粉为氮源培养约氏乳杆菌的效果没有显著差异，但是考虑到成本问题，同等重量下，酵母浸粉的

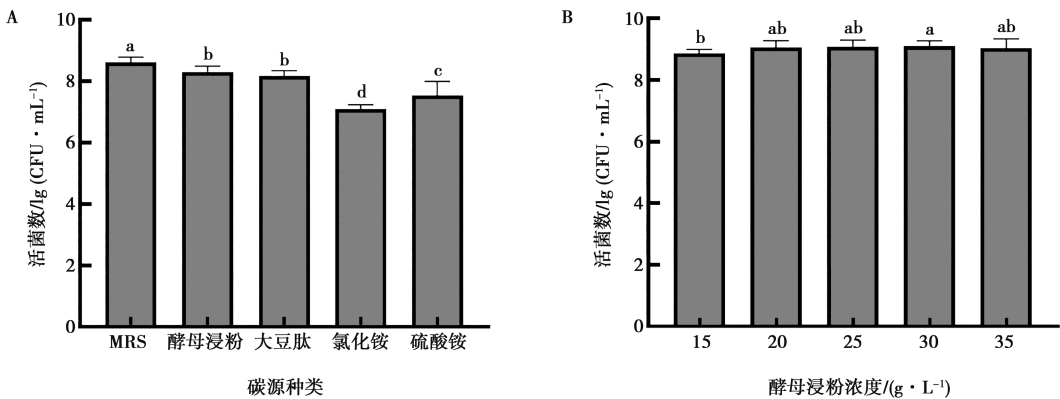


图 4 不同氮源种类 (A) 及酵母浸粉浓度 (B) 对约氏乳杆菌 L63 的影响

2.3 缓冲盐和微量元素的优化

2.3.1 植物乳杆菌 LY19 磷酸氢二钾浓度的确定

由图 5A 可知，当培养基中磷酸氢二钾的质量浓度为 2.5、3.0 和 3.5 g/L 时，菌体数量均较大，且这 3 组数据相差不大，但从经济方面考虑，选取 2.5 g/L 作为植物乳杆菌 LY19 的磷酸氢二钾最适浓度，此时活菌数为 (9.02 ± 0.10) lg CFU/mL。

2.3.2 植物乳杆菌 LY19 硫酸镁浓度的确定

由图 5B 可知，随着硫酸镁质量浓度的增加，植物乳杆菌 LY19 的生长趋势呈现先上升后下降，当硫酸镁质量浓度为 0.7 g/L 时，植物乳杆菌 LY19 的生长效果最好，达到 (9.30 ± 0.06) lg CFU/mL，因此确定 0.7 g/L 为植物乳杆菌 LY19 的硫酸镁最适浓度。

2.3.3 约氏乳杆菌 L63 磷酸氢二钾浓度的确定

由图 5C 可知，随着磷酸氢二钾质量浓度的增加，约氏乳杆菌 L63 的生长趋势呈现先上升后下降，当磷酸氢二钾浓度为 2.5 g/L 时，约氏乳杆菌 L63 的生长效果最好，达到 (8.64 ± 0.35) lg CFU/mL，因此选取 2.5 g/L 为约氏乳杆菌 L63 的磷酸氢二钾最适浓度。

2.3.4 约氏乳杆菌 L63 硫酸镁浓度的确定

由图 5D 可知，随着硫酸镁质量浓度的增加，约氏乳杆菌 L63 的生长趋势呈现先上升后下降，当硫酸镁质量浓度为 1.6 g/L 时，约氏乳杆菌 L63 的生长效果最好，达到 (8.87 ± 0.54) lg CFU/mL，因此确定

单价更低，因此最终确定酵母浸粉作为最佳氮源。

2.2.4 约氏乳杆菌 L63 酵母浸粉浓度的确定

由图 4B 可知，随着酵母浸粉质量浓度的增加，活菌数呈先上升后下降的趋势，在质量浓度达到 20 g/L 时活菌数最高，达到 (8.80 ± 0.22) lg CFU/mL。因此最优酵母浸粉质量浓度应该选择 20 g/L。

1.6 g/L 为约氏乳杆菌 L63 的硫酸镁最适浓度。

2.4 正交试验优化培养基配方和成本预算

2.4.1 植物乳杆菌 LY19 正交试验优化培养基配方和成本预算

正交试验结果如表 4 所示，基于对极差分析 (R 值) 大小排序，得知影响植物乳杆菌 LY19 生长的 4 个因素的主次顺序为磷酸氢二钾>酵母浸粉>硫酸镁>糖蜜。在 9 个试验组中，第 9 组的活菌数最高，达到 (9.48 ± 0.07) lg CFU/mL。结合 k 值赋值计算的因素水平结果，植物乳杆菌 LY19 培养基的配方是糖蜜 25 g/L，酵母浸粉 20 g/L，磷酸氢二钾 2.5 g/L，硫酸镁 0.7 g/L。按此配方称取各成分，溶解于蒸馏水中，121 ℃ 灭菌 15 min，备用。

本培养基的成本预算如表 5 所示，MRS 培养基为实验室成品培养基，其成本是根据产品购买价格 (1 020.8 元/kg) 及推荐配制浓度 (52.24 g/L) 计算得出，因此，每升 MRS 培养基的材料成本为 53.33 元。在此 MRS 培养基中，植物乳杆菌 LY19 的活菌数约为 6.46×10^{12} CFU/L，对应每 10^9 CFU 的活菌生产成本约为 0.008 3 元。相比之下，按照新优化的培养基配方，培养 1 L 植物乳杆菌 LY19 菌液所需的原料成本为 1.772 8 元。尽管活菌数 (3.02×10^{12} CFU/L) 略低于 MRS 培养基的活菌数，但其每 10^9 CFU 的活菌生产成本仅为 0.000 59 元，较 MRS 培养基降低了 92.9%。

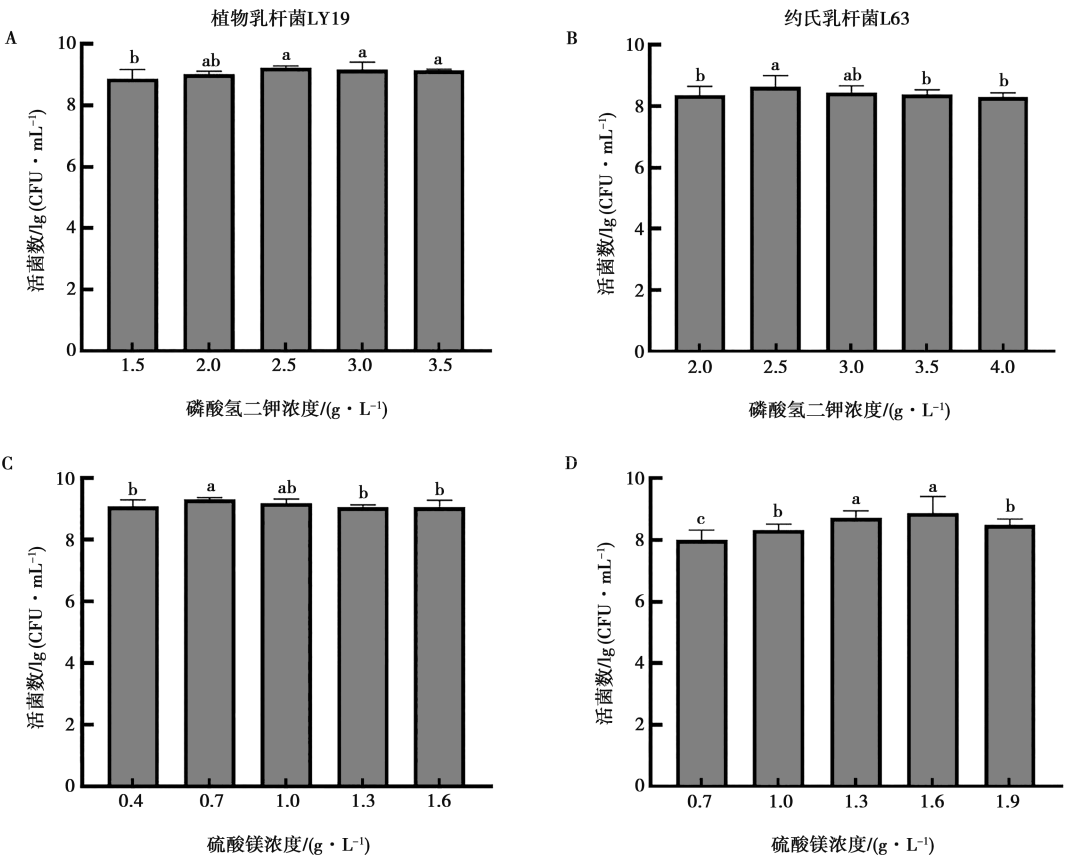


图 5 不同浓度的磷酸氢二钾和硫酸镁对植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 的影响

表 4 植物乳杆菌 LY19 培养基配方正交优化试验结果

组别	糖蜜/（g · L ⁻¹ ）	酵母浸粉/（g · L ⁻¹ ）	磷酸氢二钾/（g · L ⁻¹ ）	硫酸镁/（g · L ⁻¹ ）	活菌数/g（CFU · mL ⁻¹ ）
1	35	20	3.00	0.40	8.99±0.13
2	35	25	2.00	0.70	9.07±0.18
3	30	15	3.00	0.70	9.14±0.08
4	30	25	2.50	0.40	9.12±0.11
5	30	20	2.00	1.00	8.99±0.25
6	25	25	3.00	1.00	8.95±0.05
7	25	15	2.00	0.40	9.11±0.09
8	35	15	2.50	1.00	9.38±0.11
9	25	20	2.50	0.70	9.48±0.07
k ₁	9.15	9.02	9.04	9.12	—
k ₂	9.05	9.15	9.29	9.23	—
k ₃	9.19	9.21	9.06	9.04	—
R	0.143	0.190	0.257	0.187	—

注：k₁、k₂、k₃ 分别为各因素对应水平下活菌数的平均值；R 为极差，即同一因素下 k 值的最大值与最小值之差；—表示无此项，下同。

表 5 植物乳杆菌 LY19 培养基配方成本预算

项目	用量/（g · L ⁻¹ ）	单价/（元 · g ⁻¹ ）	成本/（元 · L ⁻¹ ）	活菌数/（CFU · L ⁻¹ ）	成本/（元 · 10 ⁻⁹ CFU）
糖蜜	25	0.002 35	0.058 8	—	—
酵母浸粉	20	0.080 00	1.600 0	—	—

续表5

项目	用量/（g·L ⁻¹ ）	单价/（元·g ⁻¹ ）	成本/（元·L ⁻¹ ）	活菌数/（CFU·L ⁻¹ ）	成本/（元·10 ⁻⁹ CFU）
磷酸氢二钾	2.5	0.040 00	0.100 0	—	—
硫酸镁	0.7	0.020 00	0.014 0	—	—
总计	—	—	1.772 8	3.02×10 ¹²	0.000 59
MRS	52.24	1.020 80	53.330 0	6.46×10 ¹²	0.008 30

2.4.2 约氏乳杆菌 L63 正交试验优化培养基配方和成本预算

正交试验结果如表 6 所示，基于对极差分析（*R* 值）大小排序，得知影响约氏乳杆菌 L63 生长的 4 个因素的主次顺序为麸皮>硫酸镁>磷酸氢二钾>酵母浸粉。在 9 个试验组中，第 9 组的活菌数最高，达到

(9.26±0.16) lg CFU/mL。结合 *k* 值赋值计算的因素水平结果，约氏乳杆菌 L63 培养基的配方是麸皮 45 g/L，酵母浸粉 30 g/L，磷酸氢二钾 2.5 g/L，硫酸镁 1.6 g/L。按此配方称取各成分，溶解于蒸馏水中，121 ℃灭菌 15 min，备用。

表 6 约氏乳杆菌 L63 培养基配方正交优化试验结果

组别	麸皮/（g·L ⁻¹ ）	酵母浸粉/（g·L ⁻¹ ）	磷酸氢二钾/（g·L ⁻¹ ）	硫酸镁/（g·L ⁻¹ ）	活菌数/lg（CFU·mL ⁻¹ ）
1	55	30	3.00	1.30	8.78±0.06
2	55	35	2.00	1.60	8.88±0.23
3	50	25	3.00	1.60	8.82±0.05
4	50	35	2.50	1.30	8.87±0.08
5	50	30	2.00	1.90	8.82±0.07
6	45	35	3.00	1.90	9.14±0.18
7	45	25	2.00	1.30	8.98±0.18
8	55	25	2.50	1.90	8.84±0.13
9	45	30	2.50	1.60	9.26±0.16
<i>k</i> ₁	26.50	26.89	26.74	26.80	—
<i>k</i> ₂	26.51	26.86	26.97	26.96	—
<i>k</i> ₃	27.38	26.64	26.68	26.63	—
<i>R</i>	0.293	0.083	0.097	0.110	—

本培养基的成本预算如表 7 所示，MRS 培养基为实验室成品培养基，计算得出每升 MRS 培养基的材料成本为 53.33 元。在此 MRS 培养基中，约氏乳杆菌 L63 的活菌数约为 2.18×10¹² CFU/L，对应每 10⁹ CFU 的活菌生产成本约为 0.024 5 元。相比之下，

按照新优化的培养基配方，培养 1 L 约氏乳杆菌 L63 菌液所需的原料成本为 2.701 2 元。尽管活菌数（1.82×10¹² CFU/L）略低于 MRS，但其每 10⁹ CFU 的活菌生产成本约为 0.001 5 元，较 MRS 培养基降低了 93.9%。

表 7 约氏乳杆菌 L63 培养基配方成本预算

项目	用量/（g·L ⁻¹ ）	单价/（元·g ⁻¹ ）	成本/（元·L ⁻¹ ）	活菌数/（CFU·L ⁻¹ ）	成本/（元·10 ⁻⁹ CFU）
麸皮	45	0.003 76	0.169 2	—	—
酵母浸粉	30	0.080 00	2.400 0	—	—
磷酸氢二钾	2.5	0.040 00	0.100 0	—	—
硫酸镁	1.6	0.020 00	0.032 0	—	—
总计	—	—	2.701 2	1.82×10 ¹²	0.001 5
MRS	52.24	1.020 80	53.330 0	2.18×10 ¹²	0.024 5

3 讨论

碳源是乳酸菌生长不可或缺的营养底物，既供给能量，又加速物质跨膜运输，推动细胞合成与代谢，从而显著促进其快速增殖^[10]。本研究表明，不同碳源对乳杆菌的生长效果是不同的，同时，不同的乳杆菌对碳源的利用也是不同的。王馨钰^[11]研究发现，植物乳杆菌 Y2 对葡萄糖的利用率最高，对其他碳源如果糖、乳糖、半乳糖、蔗糖利用率较低^[11]；张冰雁等^[12]研究表明，蔗糖促进罗伊氏黏液乳杆菌 CGMCC 24755 的效果最好，乳糖、麦芽糖、麦芽糊精等碳源次之。本研究发现当碳源浓度过高时，会反过来抑制菌株生长，这与衡利冰等^[10]研究结果一致。

氮源是构成菌体蛋白质与核酸等含氮物质的基础。研究普遍认为，有机氮源在促进菌体生长方面优于无机氮源，原因有二：一方面，其自身富含多种营养成分及未知生长因子；另一方面，无机氮源成分单一，往往需要与其他营养物质复配才能达到理想的利用效果^[13]。本研究表明，酵母浸粉促进植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 的生长效果比无机氮源如氯化铵、硫酸铵好，结果与之相同。

在乳酸菌发酵体系中，缓冲盐对于 pH 环境的动态平衡不可或缺，它能有效稳定发酵液的酸碱度，为菌体持续增殖提供适宜的理化条件，这对于维持菌群的高生理活性至关重要^[14]。乳酸菌的生长增殖依赖 Mn、Fe、Mg、Zn 等微量元素，这些元素通过充当酶的活化剂及构成生物活性物质来发挥促进作用。同时，细胞内的能量转移作为能量代谢的核心环节，也受到 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 等多种阳离子的深刻影响^[14]。本研究参考张国柱等^[8]、许喜林等^[9]研究，选择磷酸氢二钾和硫酸镁作为培养基的缓冲盐和微量元素，结果表明，添加磷酸氢二钾和硫酸镁对植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 生长有非常明显的促进作用，有利于植物乳杆菌 LY19 和约氏乳杆菌 L63 的工业化生产。

4 结论

结合单因素试验和正交试验，获得植物乳杆菌 LY19 的最优培养基配方，即：糖蜜 25 g/L，酵母浸粉 20 g/L，磷酸氢二钾 2.5 g/L，硫酸镁 0.7 g/L，活

菌数可达 (9.48 ± 0.07) lg CFU/mL，其培养基原料成本约为 1.77 元/L。约氏乳杆菌 L63 最优培养基配方：麸皮 45 g/L，酵母浸粉 30 g/L，磷酸氢二钾 2.5 g/L，硫酸镁 1.6 g/L，活菌数达到 (9.26 ± 0.16) lg CFU/mL，其培养基原料成本约为 2.70 元/L，而实验室成品培养基 MRS 成本需要 53.33 元/L。本研究为今后工业化生产乳杆菌的降本增效奠定良好的基础。

参考文献：

[1] Yang J, Shang P, Zhang B, et al. Genomic and metabonomic methods reveal the probiotic functions of swine-derived *Ligilactobacillus salivarius* [J]. BMC Microbiol, 2023, 23 (1): 242.

[2] 朱晓峰, 张桢, 崔雷鸿, 等. 猪源乳酸杆菌与益生元组合筛选及其体外发酵特性 [J]. 微生物学报, 2021, 61 (1): 104-114.

[3] 耿利利. 大豆皮发酵酶解条件优化及对育肥猪生长性能和养分消化率的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2022.

[4] 朱晓峰. 纤维降解酶与乳酸杆菌协同发酵改善菜籽粕营养价值的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.

[5] Zheng Q, Chia S L, Saad N, et al. Different combinations of nitrogen and carbon sources influence the growth and postbiotic metabolite characteristics of *Lactiplantibacillus plantarum* strains isolated from Malaysian foods [J]. Foods, 2024, 13 (19): 3123.

[6] 李英英, 丁立人, 朱平华, 等. 复合菌株固态发酵对大豆皮营养价值的影响 [J]. 动物营养学报, 2022, 34 (6): 4041-4049.

[7] 李雪莉, 王超, 虞德夫, 等. 猪源乳酸菌的分离、鉴定及其生物学特性 [J]. 微生物学报, 2017, 57 (12): 1879-1887.

[8] 张国柱, 宫俊峰, 赵玉明, 等. 植物乳杆菌高密度发酵 [J]. 食品工业, 2022, 43 (10): 144-147.

[9] 许喜林, 赵思博, 郑柳青, 等. 鼠李糖乳杆菌 LR-ZB1107-01 的培养基优化及益生特性评价 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (8): 21-29.

[10] 衡利冰, 夏永军, 艾连中, 等. 植物乳杆菌 AR307 发酵培养基优化研究 [J]. 工业微生物, 2024, 54 (1): 81-86.

[11] 王馨钰. 植物乳杆菌高密度发酵、冻干保护剂筛选及微胶囊化工艺研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.

[12] 张冰雁, 鲁曦. 罗伊氏黏液乳杆菌培养基及培养条件优化研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2025, 43 (5): 97-105.

[13] 董雪, 刘晓露, 李丽蓓, 等. 地衣芽孢杆菌产芽孢培养基和培养条件的优化 [J]. 中国饲料, 2024 (1): 36-43, 50.

[14] 周亮. 格氏乳杆菌 G098 的培养基优化及高密度发酵工艺研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.