

贝莱斯芽孢杆菌发酵培养基的响应面法优化

陈玉杰¹, 赵晨燕², 王亚东¹, 张超波^{1,2,*}

1. 山东农满谊农业科技有限公司, 山东 聊城, 252100

2. 聊城大学, 药学与食品工程学院, 山东 聊城, 252000

摘要: 以 *Bacillus velezensis* 为试验菌株, 选取酵母浸粉、胰蛋白胨、氯化钠 3 个培养基组分, 结合单因素试验与 Box-Behnken 响应面设计优化发酵培养基。单因素试验结果表明, 酵母浸粉、胰蛋白胨显著影响菌体生长, 氯化钠在设置浓度范围内仅微弱促进菌株增殖, 因素影响强弱顺序为酵母浸粉 > 胰蛋白胨 > 氯化钠。响应面分析显示, 各因素两两交互作用均不显著 ($P > 0.05$)。虽然整体回归模型未达到显著水平, 但模型寻优结果具备参考价值, 得到最优培养基配方: 酵母浸粉 6.5 g/L、胰蛋白胨 25.5 g/L、氯化钠 14.5 g/L。验证试验结果表明, 基础培养基条件下菌株最大 OD₆₀₀ 为 2.827; 优化后培养基菌株最大 OD₆₀₀ 可达 6.721, 生物量较优化前提升 137.74%, 实测值与模型预测值相对误差小于 5%。该优化培养基可显著提高 *Bacillus velezensis* 生物量, 为菌株高密度发酵工艺提供参考。

关键词: 贝莱斯芽孢杆菌; 培养基优化; 响应面法; 二次多项式模型; 生物量

Response Surface Method Optimization of *Bacillus velezensis* Fermentation Medium

Chen Yujie¹, Zhao Chenyan², Wang Yadong¹, Zhang Chaobo^{1,2,*}

1. Shandong Nongmanyi Agricultural Technology Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252100

2. Liaocheng University, School of Pharmacy and Food Engineering, Liaocheng, Shandong, 252000

Abstract: Using *Bacillus velezensis* as the test strain, three medium components—yeast extract powder, tryptone, and sodium chloride—were selected, and the fermentation medium was optimized using a combination of single-factor experiments and Box-Behnken response surface design. Results from the single-factor experiments showed that yeast extract powder and tryptone had a significant effect on cell growth, while sodium chloride only slightly promoted strain growth within the tested concentration range. The strength of factor influence was in the order: yeast extract powder > tryptone > sodium chloride. Response surface analysis indicated that the interactions between any two factors were not significant ($P > 0.05$). Although the overall regression model did not reach a significant level, the optimization results from the model were still useful as a reference. The optimal medium formulation was determined to be: yeast extract powder 6.5 g/L, tryptone 25.5 g/L, sodium chloride 14.5 g/L. Verification tests showed that under the basic medium conditions, the maximum OD₆₀₀ of the strain was 2.827, while in the optimized medium, the maximum OD₆₀₀ reached 6.721, representing a 137.74% increase in biomass compared to before optimization, with a relative error between the measured value and the predicted value of less than 5%. This optimized medium can significantly increase the biomass of *Bacillus velezensis* and provides a reference for high-density fermentation processes of the strain.

Keywords: *Bacillus velezensis*; Medium optimization; Response surface methodology; Quadratic polynomial regression model; Biomass

贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)是一种革兰氏阳性好氧细菌,最早于1998年从西班牙贝莱斯市的土壤中分离鉴定并命名^[1]。可定殖于植物根际、体表及体内,通过产生脂肽类、聚酮类等抗菌物质抑制植物病原微生物的生长繁殖^[2];同时可分泌植物生长调节物质,促进根系发育与养分吸收,并具备溶磷、解钾、固氮及降解土壤有机污染物等多重有益功能^[3]。在逆境条件下,贝莱斯芽孢杆菌能形成高抗逆性的休眠芽孢,这一特性极大地方便了制剂的工业化生产、储存与运输,使其相较其他生防微生物展现出更为显著的应用优势。目前,该菌已成功应用于粮食作物、蔬菜和果树等多种作物的病害防治与提质增产,是开发微生物菌肥与生物农药复合制剂的核心菌株之一,其应用潜力已得到国内外研究与生产实践的广泛证实^[4,5]。

当前,我国农业正向绿色、生态、高效方向转型,减少化学肥料与化学农药投入、开发环境友好的生物农业制剂已成为必然趋势。我国耕地土壤普遍存在养分利用率低、土传病害频发等问题,贝莱斯芽孢杆菌制剂的施用可有效改善土壤微生态环境、提升作物自身抗逆性,在实现减药减肥与提质增产双重目标方面潜力突出^[6,7]。然而,该菌的工业化液态发酵目前仍普遍面临活菌数低、培养成本高、发酵工艺不成熟等技术瓶颈,直接导致制剂产品的应用效果稳定性不足,严重制约了其规模化推广。因此,对发酵培养基进行系统优化以提升菌体生物量与发酵效率,是降低生产成本、突破产业化关键障碍的核心环节,对于推动贝莱斯芽孢杆菌生物制剂的产业化发展和助力我国绿色农业建设具有重要的现实意义与应用价值。

为提升贝莱斯芽孢杆菌菌体发酵水平,本研究选取酵母浸粉、胰蛋白胨、氯化钠3种培养基组分,采用单因素试验结合 Box-Behnken 响应面设计开展发酵培养基优化,以 OD₆₀₀ 值和菌体生物量为响应指标,确定最佳液态发酵培养基配方^[8-10]。研究通过构建回归模型并进行模型诊断与验证,系统解析各成分之间的交互效应,旨在为该菌株提供科学、可行的工业化液态发酵培养基配方与技术参数,从根本上解决其发酵生产中生物量偏低的技术难题,为后续贝莱斯芽孢杆菌生物制剂的研发与规模化生产奠定坚实基础。

1 材料与方法

1.1 菌株来源

供试菌株为聊城大学现代生物技术与环境保护课题组保存。

1.2 主要试剂与仪器

主要试剂:酵母浸粉、胰蛋白胨、氯化钠等均购自国药集团化学试剂有限公司。

主要仪器:紫外可见分光光度计、高压蒸汽灭菌锅、恒温培养箱、超净工作台、光学显微镜、PCR 扩增仪、电泳仪。

1.3 菌株生长曲线测定

将低温保藏的纯化菌株划线活化,挑取单菌落接入 LB 液体培养基,37℃、180 rpm 振荡培养制备种子液, LB 培养基广泛应用于土壤细菌的活化培养^[11-13]。按照 1%接种量将种子液转接至新鲜 LB 液体培养基,相同条件下恒温振荡培养,设置 3 组平行试验。以未接种的 LB 液体培养基作为空白对照,每隔 2 h 取样,采用分光光度计测定菌液 OD₆₀₀ 值。持续取样监测直至菌株进入衰亡期。以培养时间为横坐标、OD₆₀₀ 平均值为纵坐标绘制生长曲线,分析菌株生长动态变化规律。

1.4 单因素试验

以 LB 液体培养基为基础培养基,选取酵母浸粉、胰蛋白胨、氯化钠分别设置梯度水平,其余培养条件保持恒定,试验设计如表 1 所示。将活化制备的种子液按 1%接种量转接至各组培养基,37℃、

180 rpm 恒温振荡培养，每组设置 3 次平行试验。分别在 13 h、15 h、17 h、19 h、21 h、23 h 取样，测定菌液 OD₆₀₀，以吸光度值表征目标菌株生长水平。根据试验结果筛选关键影响因子及其适宜水平，为后续响应面试验设计提供依据。

表 1 单因素试验因素与水平设置

Table 1 Factors and Levels Setting for Univariate Experiment	
影响因素	梯度设置 (g/L)
酵母浸粉	2、3、5、7、9
胰蛋白胨	18、22、26、30、34
氯化钠	8、10、12、14、16

1.5 响应面试验

在单因素试验基础上，选取 A 酵母浸粉、B 胰蛋白胨、C 氯化钠为自变量，以菌液 OD₆₀₀ 值为响应值，采用 Box-Behnken 三因素三水平试验设计开展响应面优化研究，如表 2 所示。本试验共设置 15 组试验组合，其中包含 3 组中心点重复试验。利用 Design-Expert 软件构建二次多项式回归模型，对试验数据进行方差分析、模型显著性检验及各因素交互作用分析，通过数值优化求解菌株最优培养条件^[14,15]。各试验组均设置 3 次平行，保证试验数据可靠。

表 2 响应面试验因素表

Table 2 Factors in the Response Surface Experiment			
因素	水平 (g/L)		
	-1	0	+1
酵母浸粉	6.5	7.0	7.5
胰蛋白胨	25.5	26.0	26.5
氯化钠	13.5	14.0	14.5

1.6 优化条件验证试验

根据响应面模型数值优化结果，得到目标菌株理论最优培养条件。在该组合条件下开展验证试验，设置 3 组平行重复，测定菌液 OD₆₀₀。将实测平均结果与模型预测值进行对比，验证回归模型的有效性 with 最优条件的可靠性。

1.7 数据处理

试验原始数据采用 Excel 软件整理，运用 Design-Expert 13 软件开展响应面模型构建、方差分析与绘图。以 P<0.05 作为差异具有统计学显著性的判定标准。

2 结果与分析

2.1 菌株生长曲线测定与单因素优化结果

在 37 °C、180 rpm 振荡培养条件下，测得贝莱斯芽孢杆菌在 LB 液体培养基中的生长曲线如图 1A 所示。菌株生长呈现典型分批培养动力学特征，可划分为延迟期、对数生长期、稳定期与衰亡期。本试验条件下，菌株延迟期为 0~4 h；4~18 h 处于对数生长期，菌体快速增殖；生物量峰值出现在 18~20 h，随后进入衰亡期。后续试验种子液可选取 12~16 h 对数生长后期的菌液进行接种。

如图 1B 所示，不同酵母浸粉浓度对贝莱斯芽孢杆菌的生长具有显著影响。在 2~9 g/L 范围内，菌株生物量随酵母浸粉浓度升高呈浓度依赖性提升：2 g/L、3 g/L 组生长受抑，OD₆₀₀ 峰值仅为 3.9、5.0，且提前进入衰亡期；5 g/L 组生长性能显著改善；7 g/L 与 9 g/L 组生长曲线高度重合，OD₆₀₀ 峰值均达 6.5 以上，稳定期延长。综合生长性能与成本，确定 7 g/L 为贝莱斯芽孢杆菌的最适酵母浸粉浓度。

如图 1C 所示,不同胰蛋白胨浓度对贝莱斯芽孢杆菌的生长具有显著影响。在 18~34 g/L 范围内,菌株生物量随胰蛋白胨浓度升高呈现先上升后趋于稳定的变化规律:18 g/L 组生长受抑,OD₆₀₀ 峰值仅为 5.3,增殖速率最慢且衰亡期下降幅度最大;22 g/L 组生长性能显著改善;26 g/L 组生长表现最优,OD₆₀₀ 峰值达 6.4,增殖速率最快且稳定期生物量最高;30 g/L 与 34 g/L 组生长曲线高度重合,OD₆₀₀ 峰值均维持在 6.0 左右,未随浓度升高继续提升,出现明显的营养饱和效应。综合生长性能与成本,确定 26 g/L 为贝莱斯芽孢杆菌的最适胰蛋白胨浓度。

如图 1D 所示,不同氯化钠浓度对贝莱斯芽孢杆菌的生长具有显著影响。在 8~16 g/L 范围内,菌株生物量随氯化钠浓度升高呈现先上升后趋于稳定的变化规律:8 g/L 组生长性能最差,OD₆₀₀ 峰值仅为 2.25,增殖速率最慢且衰亡期下降幅度最大;10 g/L 组生长显著改善,OD₆₀₀ 峰值提升至 2.55;14 g/L 组生长表现最优,OD₆₀₀ 峰值达 3.15;12 g/L 与 16 g/L 组生长性能接近,OD₆₀₀ 峰值分别为 2.9、2.85,略低于 14 g/L 组,未随浓度升高继续提升,出现明显的营养/渗透压饱和效应。综合生长性能与成本,确定 14 g/L 为贝莱斯芽孢杆菌的最适氯化钠浓度。

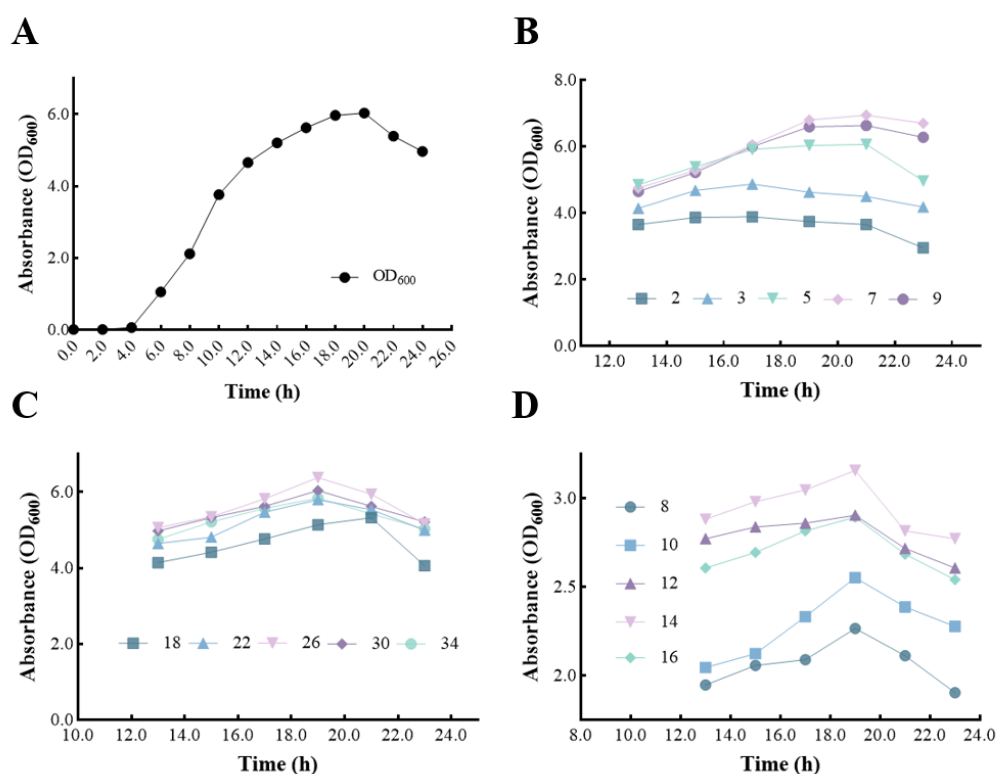


图 1 贝莱斯芽孢杆菌在 LB 液体培养基中的生长曲线 (A) 以及不同浓度酵母浸粉 (B)、胰蛋白胨 (C) 和氯化钠 (D) 对贝莱斯芽孢杆菌生长的影响

Figure 1 Growth curve of *Bacillus velezensis* in LB liquid medium (A) and the effects of different concentrations of yeast extract powder (B), tryptone (C), and sodium chloride (D) on *Bacillus velezensis* growth

2.2 响应面法优化培养基配方

基于单因素试验结果,选取酵母浸粉(A)、胰蛋白胨(B)、氯化钠(C)3个变量开展 Box-Behnken 试验,以贝莱斯芽孢杆菌的菌液 OD₆₀₀ 作为响应值,进行三因素三水平响应面分析^[1],确定最优培养基配方。

2.2.1 模型拟合与方差分析

根据 Box-Behnken 设计方案,共设计 15 组实验,实验结果见表 3。

表 3 响应面试验设计与结果表

Table 3 Response Surface Experiment Design and Results

实验序号	A	B	C	OD ₆₀₀
	酵母浸粉 (g/L)	胰蛋白胨 (g/L)	氯化钠 (g/L)	
1	6.5	25.5	14.0	6.567
2	7.5	25.5	14.0	6.105
3	6.5	26.5	14.0	6.017
4	7.5	26.5	14.0	5.918
5	6.5	26.0	13.5	6.061
6	7.5	26.0	13.5	5.819
7	6.5	26.0	14.5	6.721
8	7.5	26.0	14.5	5.786
9	7.0	25.5	13.5	6.259
10	7.0	26.5	13.5	6.006
11	7.0	25.5	14.5	6.226
12	7.0	26.5	14.5	5.863
13	7.0	26.0	14.0	5.775
14	7.0	26.0	14.0	6.358
15	7.0	26.0	14.0	6.204

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行二次多项式回归拟合，构建以 OD₆₀₀ 为响应值的回归方程：

$$Y = 6.11 - 0.2173A - 0.1691B + 0.0564C + 0.0908AB - 0.1733AC + 0.0088BC - 0.0234A^2 - 0.0151B^2 - 0.0497C^2$$

式中：Y 为预测 OD₆₀₀；A、B、C 分别代表酵母浸粉、胰蛋白胨、氯化钠浓度。

不同阶次模型拟合筛选结果表明，二次模型为本体系最优拟合形式。回归模型方差分析结果如表 4 所示，该模型 P=0.3660>0.05，整体模型未达到显著水平。各项因子显著性结果显示，酵母浸粉（A，P=0.0574）接近显著水平；胰蛋白胨、氯化钠、各交互项及二次项 P 均大于 0.05，对菌株生物量无显著影响。

表 4 方差分析结果

Table 4 Variance Analysis Results

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	not significant
Model	0.7973	9	0.0886	1.42	0.3660	
A-酵母浸粉	0.3776	1	0.3776	6.04	0.0574	
B-胰蛋白胨	0.2288	1	0.2288	3.66	0.1138	
C-氯化钠	0.0254	1	0.0254	0.4069	0.5516	
AB	0.0329	1	0.0329	0.5272	0.5003	
AC	0.1201	1	0.1201	1.92	0.2243	
BC	0.0030	1	0.0030	0.0484	0.8345	
A ²	0.0021	1	0.0021	0.0336	0.8618	
B ²	0.0009	1	0.0009	0.0144	0.9093	
C ²	0.0057	1	0.0057	0.0918	0.7741	
Residual	0.3124	5	0.0625			

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	not significant
Lack of Fit	0.1299	3	0.0433	0.4743	0.7320	not significant
Pure Error	0.1825	2	0.0913			
Cor Total	1.11	14				

2.2.2 单因素效应分析

各因素对贝莱斯芽孢杆菌 OD₆₀₀ 的影响趋势见图 2。随酵母浸粉、胰蛋白胨浓度升高，菌体 OD₆₀₀ 呈下降趋势；氯化钠浓度提升仅带来 OD₆₀₀ 微弱上升，对菌体生长影响极小。

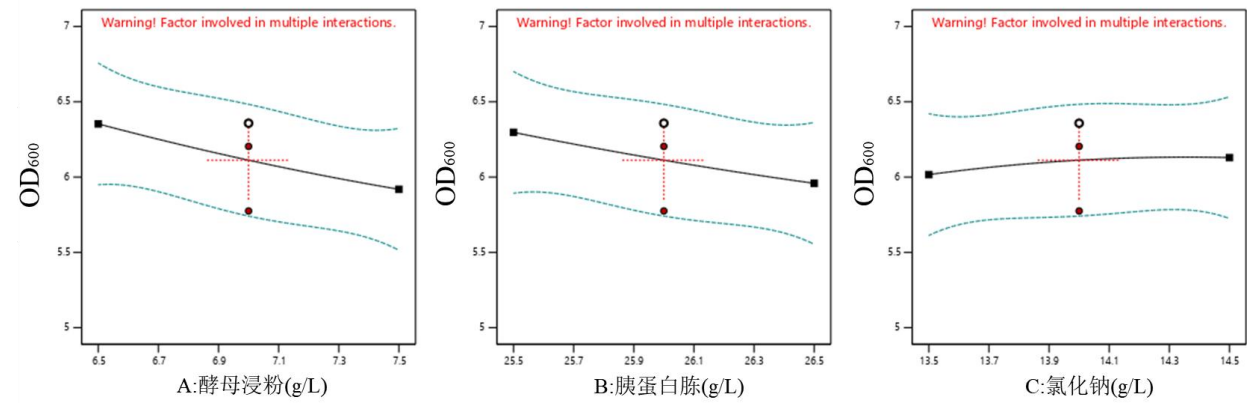


图 2 各因素对贝莱斯芽孢杆菌 OD₆₀₀ 的影响
Figure 2 Effects of Various Factors on the OD₆₀₀ of *Bacillus velezensis*

扰动分析结果（图 3）显示，酵母浸粉与胰蛋白胨表现明显负效应，氯化钠效应微弱。各因素影响强弱排序：酵母浸粉>胰蛋白胨>氯化钠，与方差分析结论相吻合。

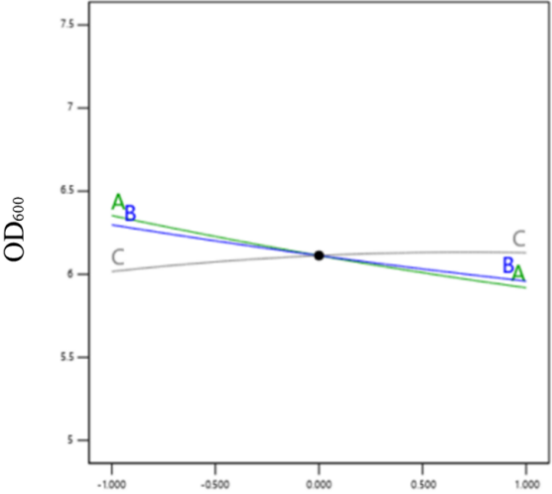


图 3 因素扰动分析图
Figure 3 Factor Perturbation Analysis Chart

2.2.3 因素交互作用与响应面分析

为直观反映各因素交互作用对贝莱斯芽孢杆菌 OD₆₀₀ 值的影响，固定其中一个因素为中心水平，绘制 3D 响应面与等高线图进行分析。

酵母浸粉与胰蛋白胨的响应面结果见图 4，等高线近似平行直线，二者交互作用不显著($P>0.05$)。响应曲面平缓倾斜，OD₆₀₀ 随两组分浓度降低而上升，最优区间位于 $A=6.5\text{ g/L}$ 、 $B=25.5\text{ g/L}$ 附近，酵母浸粉效应略高于胰蛋白胨。

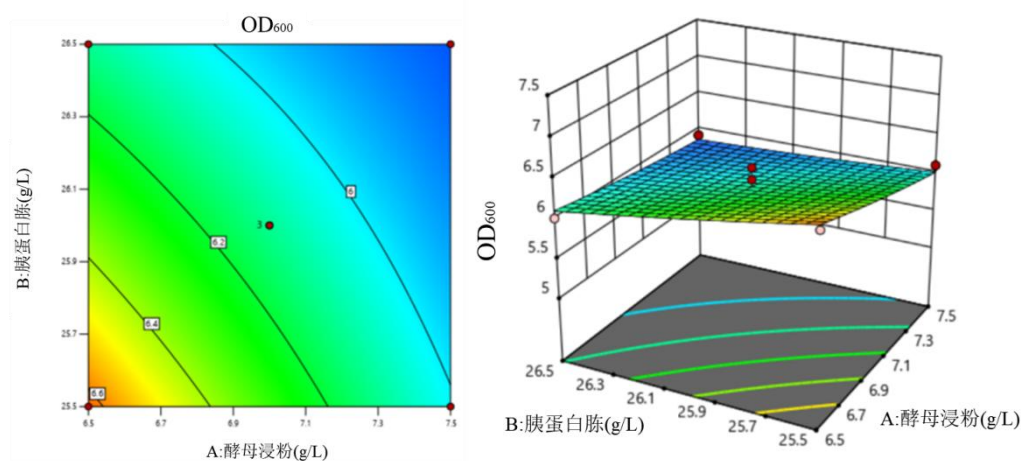


图 4 酵母浸粉与胰蛋白胨交互作用等高线图（左）与 3D 响应面图（右）

Figure 4 Contour plot (left) and 3D response surface plot (right) of the interaction between yeast extract powder and tryptone

酵母浸粉与氯化钠组合（图 5）等高线轻微弯曲，存在一定交互趋势但未显著（ $P>0.05$ ）。响应曲面坡度较大，酵母浸粉对菌体生长的影响远大于氯化钠，在 $A = 6.5 \text{ g/L}$ 、 $C = 14.5 \text{ g/L}$ 时 OD_{600} 可达 6.7 以上。

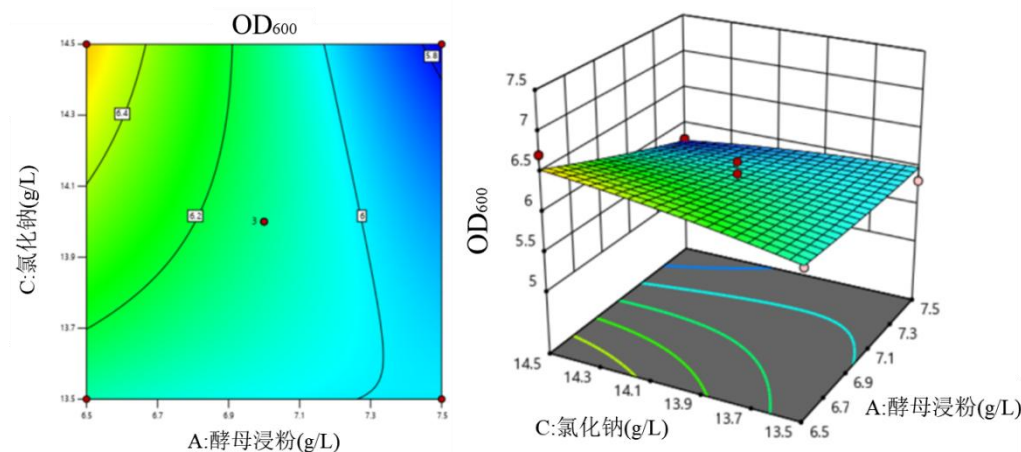


图 5 酵母浸粉与氯化钠交互作用等高线图（左）与 3D 响应面图（右）

Figure 5 Contour plot (left) and 3D response surface plot (right) of the interaction between yeast extract powder and sodium chloride

胰蛋白胨与氯化钠（图 6）等高线接近平行直线，交互作用极不显著（ $P>0.05$ ）。响应曲面整体平缓，两种因素影响程度均较低，仅在 $B=25.5 \text{ g/L}$ 、 $C=14.5 \text{ g/L}$ 时生物量小幅提高。

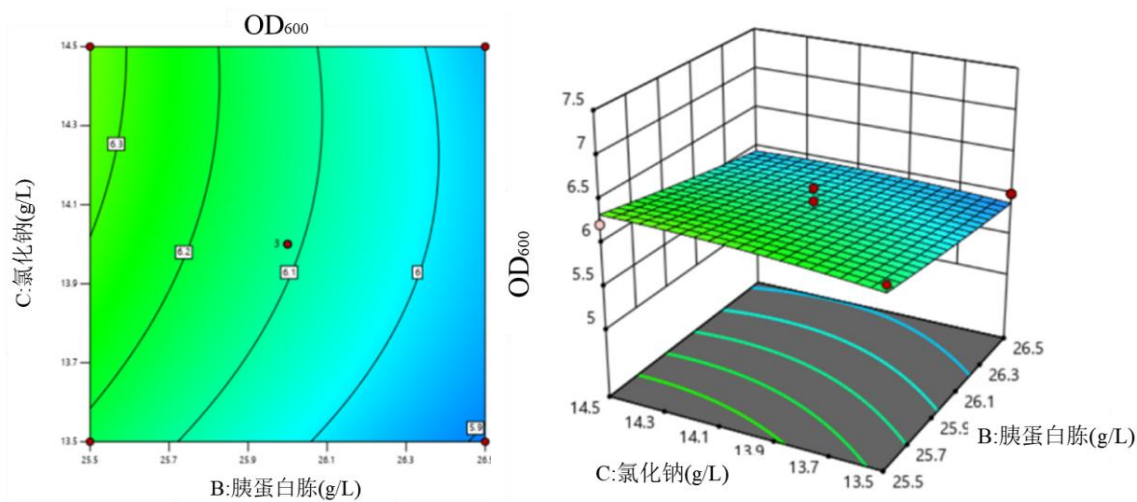


图 6 胰蛋白胨与氯化钠交互作用等高线图（左）与 3D 响应面图（右）

Figure 6 Contour plot (left) and 3D response surface plot (right) of the interaction between tryptone and sodium chloride

综上，三种组分两两交互均无统计学显著性，与方差分析结果相互印证。

2.2.4 最优配方确定

综合单因素效应与交互作用分析结果，绘制全因素空间响应值立方体图（图 7）。由立方体图可见，OD₆₀₀ 最大值 6.721 出现在酵母浸粉低浓度、胰蛋白胨低浓度、氯化钠中浓度的组合区域，对应条件为 A = 6.5 g/L、B = 25.5 g/L、C = 14.5 g/L。相较于 A = 7 g/L、B = 26 g/L、C = 14 g/L 的组合，该条件下 OD₆₀₀ 提升约 12%。综合考虑培养成本与试验稳定性，最终确定贝莱斯芽孢杆菌最优培养基配方：酵母浸粉 6.5 g/L、胰蛋白胨 25.5 g/L、氯化钠 14.5 g/L。

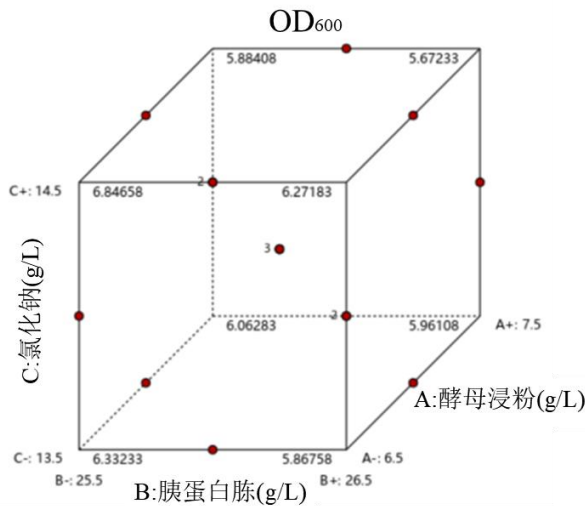


图 7 贝莱斯芽孢杆菌培养基优化全因素响应面立方体图

Figure 7 Cube plot of full-factor response surface for *Bacillus velezensis* culture medium optimization

2.2.5 验证实验

为验证响应面法所得最优培养基配方对菌株生长的提升效果，开展对比验证试验。分别采用优化后培养基（酵母浸粉 6.5 g/L、胰蛋白胨 25.5 g/L、氯化钠 14.5 g/L）与优化前基础培养基（酵母浸粉 5 g/L、胰蛋白胨 10 g/L、氯化钠 10 g/L）进行摇瓶培养，于发酵 20 h 测定 OD₆₀₀。结果显示，基础培养基内菌株最大 OD₆₀₀ 为 2.827；优化培养基条件下菌株最大 OD₆₀₀ 可达 6.721，菌体生物量较

优化前提升 137.75%。将实测结果与模型理论预测值对比,二者相对误差小于 5%,说明该回归模型具备较好预测能力,优化所得培养基配方可靠性良好,能够有效促进菌株生长。

3 结论

本研究通过单因素试验明确了酵母浸粉、胰蛋白胨、氯化钠对贝莱斯芽孢杆菌生长的影响规律,其中酵母浸粉与胰蛋白胨是限制菌体增殖的关键组分。基于 Box-Behnken 设计构建的回归模型虽整体不显著,但仍可用于培养基配比的寻优分析,各组分之间不存在显著的交互效应。

经模型计算得到最优培养基组成:酵母浸粉 6.5 g/L、胰蛋白胨 25.5 g/L、氯化钠 14.5 g/L。摇瓶验证证实该配方能够大幅提升菌体生物量。相较于传统 LB 基础培养基,优化体系下菌株生物量提升 137.74%,实测值与模型预测值相对误差小于 5%,证明该优化配方可有效提升贝莱斯芽孢杆菌生物量,为该菌株高密度发酵培养提供参考。

本研究所获得的培养基配方可为贝莱斯芽孢杆菌液体发酵提供基础工艺参数,后续可进一步结合培养条件(温度、转速、pH)协同优化,进一步完善该菌株高密度发酵体系。

参考文献

- [1] 周淑贞,辜质纯,张瑞雪,等. 贝莱斯芽孢杆菌的鉴定和抑菌作用研究[J]. 广东畜牧兽医科技, 2023, 48(4): 30-34+41.
- [2] 周文文,徐锋平,朱佳军,等. 贝莱斯芽孢杆菌的生物防治及其基因改良[J]. 农业工程学报, 2025, 41(23): 274-282.
- [3] Zhang H, Cui C, Li S, et al. Bio-Organic Fertilizer with *Bacillus velezensis* Promoted Plant Growth by Regulating Soil Microbial Community Structure and C/N Cycle Function[J]. Plants, 2026, 15(3): 382-382.
- [4] Luo F R, Zhang Y S, Wu X Y, et al. *Bacillus velezensis* RF2 Rescued from Citrus Phyllosphere: Dual Mechanisms and Broad-Spectrum Activity for Controlling Citrus Bacterial Canker[J]. Microorganisms, 2026, 14(1): 121-121.
- [5] Kang JA, Lee YH. Biocontrol of Bacterial Seedling Rot in Rice Plants Using *Bacillus velezensis* JBCS608 and Its Formulated Products. Plant Pathol J. 2025 Dec;41(6): 790-799.
- [6] 宁豫昌,吴祖芳,龚婷. 贝莱斯芽孢杆菌的生物学特性研究[J]. 中国兽医杂志, 2022, 58(7): 25-32.
- [7] Ye L, Zhu Q, Han J, et al. Whole genome analysis, fermentation process, and development of plant functional microbial fertilizer for *Bacillus velezensis* YU18 in mangrove[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2026, 119(2): 37-37.
- [8] 马红珍,闫敏,李磊等. 基于响应面法优化贝莱斯芽孢杆菌 C44 发酵参数[J]. 山西农业科学, 2023, 51(9): 1088-1097.
- [9] 张梦华,曲远航,王培培等. 生防贝莱斯芽孢杆菌 SD23LJ1314 发酵培养基的筛选及优化[J]. 生物技术进展, 2026, 16(1): 131-139.
- [10] 张根林,胡可心,周超等. 贝莱斯芽孢杆菌 G127 的高密度发酵工艺优化[J]. 西安工程大学学报, 2025, 39(1): 17-25.
- [11] 石慧敏,叶建仁,王焱等. 响应面优化贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)菌株 YH-18 产芽孢培养基和培养条件[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 209-218.
- [12] Zou X, Yang S, Li Y, et al. Isolation and Purification of Extracellular Inhibitory Products from *Bacillus velezensis* YJ0-1 and Optimization of Fermentation Medium[J]. Fermentation, 2025, 11(10): 595-595.
- [13] Cao H, Chen Z, Li X, et al. Optimization of fermentation conditions for *Bacillus velezensis* TCS001 and evaluation of its growth promotion and disease prevention effects on strawberries[J]. Biological Control, 2024, 198: 105632-105632.
- [14] 杨可,司文,林海,林方锐,袁静,陈杰. 利用响应面分析法优化贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 的发酵条件[J]. 农药学学报, 2019, 21(4): 444-452.
- [15] 刘芳,廖先清,周荣华等. 响应面法优化贝莱斯芽孢杆菌 CY30 发酵培养基的研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(23): 91-94.

基金项目: 校企合作项目—合成生物学产品开发(K23LD81), 农用益生菌菌剂新产品开发

(K25LD128)

¹**第1作者简介:** 陈玉杰(1983-), 男, 研究方向: 微生物种质资源开发。E-mail: sdh_cyj@163.com。

***通讯作者简介:** 张超波(1982-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 微生物种质资源开发。E-mail: zhangchaobo@lcu.edu.cn。