



桑萌,杨欣渝,杨光宇,毛江平,郭俏,来航线. *Pseudomonas koreensis* 发酵工艺优化及其对玉米促进生长和提高质量的效果研究[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(08):75-86.

SANG Meng, YANG Xinyu, YANG Guangyu, MAO Jiangping, GUO Qiao, LAI Hangxian. Fermentation process optimization of *Pseudomonas koreensis* and its effect on the growth promotion and quality improvement of corn[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(08):75-86.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.07

Pseudomonas koreensis 发酵工艺优化及其对玉米促进生长和提高质量的效果研究

桑萌 杨欣渝 杨光宇 毛江平 郭俏 来航线*

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要 为探究韩国假单胞菌(*Pseudomonas koreensis* GS, 以下简称GS)的液体发酵滤液是否具有促进植物生长、提高植物抗逆性的作用,以GS菌株发酵液中活菌数和菌悬液OD₆₀₀值为试验的检测指标,采用单因素试验对GS菌株的接种量、培养温度、时间、转速和pH等5个方面进行筛选优化以确定最优发酵条件;对不同种类的碳源、氮源和无机盐进行单因素试验以确定最适培养基组分,并进行正交试验优化培养基配比和浓度,以筛选确定最优发酵培养基;通过测定玉米的生物学和品质指标以验证GS发酵滤液的田间应用效果。结果表明:1)优化后最适培养基配方的碳源为m(牛肉膏):m(糖蜜)=1:1,5 g/L;氮源为酵母浸膏,5 g/L;无机盐为m(氯化钠):m(硫酸镁)=1:2,5 g/L。2)最适发酵条件为发酵时长为24 h,温度为30℃,pH为7,接种量为0.5%,转速为200 r/min。3)按该方案发酵生产的活菌数达到 1.38×10^{11} cfu/mL,OD₆₀₀值达到1.89,为优化前的8.36倍,且生产成本可大约节省30%~40%。4)经GS处理的玉米株高、茎叶鲜重、茎叶干重、根系鲜重、根系干重分别增加17.28%、35.13%、53.56%、40.65%、25.38%,分叶数量、根系活力和玉米棒长分别增加6.35%、37.82%和11.45%。5)籽粒中全磷、钙和淀粉含量分别增加30.19%、60.82%和31.67%,全氮、黄酮和粗蛋白含量分别增加9.93%、51.85%和10.01%。总之,优化后的培养基配方和发酵条件相对NB培养基和初始发酵条件,不仅可有效提高单位体积发酵液中GS菌株的菌体量,也可降低培养基成本,且GS发酵滤液具有促进植物生长、提高品质的良好田间应用效果。本研究可为GS的高效发酵和田间应用提供科学依据。

关键词 *Pseudomonas koreensis*; 发酵工艺优化; 玉米; 提质促生; 田间应用

中图分类号 Q815

文章编号 1007-4333(2025)08-0075-12

文献标志码 A

Fermentation process optimization of *Pseudomonas koreensis* and its effect on the growth promotion and quality improvement of corn

SANG Meng, YANG Xinyu, YANG Guangyu, MAO Jiangping, GUO Qiao, LAI Hangxian*

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract This study aimed to clarify whether the liquid fermentation broth of *Pseudomonas koreensis* GS

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: 鄂尔多斯市科技重大专项(2022EEDSKJZDZX019);咸阳市“科学家+工程师”队伍建设项目(L2024-CXNL-KJRCTD-DWJS-0005);陕西省重点研发计划(S2024-YF-ZDCXL-ZDLNY-0162);陕西省重点研发计划(S2024-YF-ZDXM-NY-0223)

第一作者: 桑萌(ORCID:0009-0003-5499-539X),硕士研究生,E-mail: sangmengnwafu@qq.com

通讯作者: 来航线(ORCID:0000-0001-7732-3156),教授,主要从事微生物生态及退化土壤生物修复研究,E-mail: laihangxian@163.com

(Hereinafter referred to as GS) has the effects of promoting plant growth and improving plant resistance. The viable bacteria number in the fermentation broth of GS strain and the OD_{600} value of the bacterial suspension were used as the test indexes, and a one-way test was used to screen and optimize the inoculum amount, incubation temperature, time, shaking speed and pH of GS strains in order to determine the optimal fermentation conditions. The one-way test was carried out on the different carbon resources, nitrogen resources and inorganic salts to determine the optimal medium components. An orthogonal test was carried out to optimize the ratio of the medium and its concentration to screen and determine the optimal fermentation medium. The biological and quality indicators of corn were determined to verify the field application of GS fermentation filtrate. The optimal ratio and concentration of the fermentation medium were confirmed by orthogonal tests. The biological and quality indexes of maize were measured to verify the field application of the GS fermentation filtrate. The results showed that: 1) The optimal carbon source for the optimized culture medium formula was carbon source m (beef paste): m (molasses)=1:1, 5 g/L; yeast extract, nitrogen source 5 g/L; inorganic salt m (sodium chloride): m (magnesium sulfate)=1:2, 5 g/L inorganic salt. 2) The optimal fermentation conditions were fermentation duration of 24 h, temperature 30 °C, pH 7, inoculum quantity 0.5%, and shaking rate 200 r/min. 3) The viable bacterial count reached 1.38×10^{11} cfu/mL and the OD_{600} value reached 1.89, which was 8.36 times higher than that before optimization, and the cost of the production was saved by 30% to 40%. 4) The plant height, stem and leaf fresh weight, stem and leaf dry weight, root fresh weight and root dry weight were increased by 17.28%, 35.13%, 53.56%, 40.65% and 25.38%, respectively, and the leaves number, root activity and the corn length were increased by 6.35%, 37.82% and 11.45%, respectively. 5) The contents of total phosphorus, calcium and starch were increased by 30.19%, 60.82% and 31.67%, respectively, while the contents of total nitrogen, flavonoids and crude protein were increased by 9.93%, 51.85% and 10.01%, respectively. In summary, the optimized medium formulation and fermentation conditions relative to the NB medium and initial fermentation conditions can not only effectively increase the bacterial volume of GS strains per unit volume of fermentation broth, but also reduce the cost of the medium. Moreover, the GS fermentation filtrate has a good field application effect of promoting plant growth and improving the quality. This study can provide a scientific basis for the efficient fermentation and field application of GS.

Keywords *Pseudomonas koreensis*; fermentation process optimization; corn; improve quality and promote growth; field applications

微生物菌剂的使用可以提高农产品产量、改善农产品品质、提高化肥利用效率、改善根际环境和保护生态环境,在农业生产中具有重要的实践意义^[1-2]。韩国假单胞菌(*Pseudomonas koreensis* GS, 以下简称GS)是一类极具应用前景的根际微生物,因其可高效定殖于植物根际,具有活化土壤中可利用性养分、改善土壤理化性质、保护植物免受病原菌侵害等特性,被视为极具促生和生防潜力的优势种群^[3-4]。前期研究发现,GS发酵滤液具有显著促进植物生长和提高植物逆境耐受性的功能^[5-7]。GS无菌发酵滤液通过提高番茄促生相关基因如*LeEXP2*表达,来促进番茄生长^[8],并通过生长素和多酚相关途径提高番茄胁迫耐受性^[9]。此外,GS发酵滤液通过对叶啉和叶绿素结合的抗氧化系统的调节,减轻干旱对光合作用的影响,从而提高果糖

和甘露糖的积累,缓解番茄干旱胁迫^[6]。鉴于GS具有良好促进植物生长、提高植物亚低温耐受性的功能特征,亟需对其发酵条件进行优化。然而,截至目前,大多数研究仍局限在单独的发酵培养条件优化或单独的配方优化,且优化后发酵所得菌量偏低,效果不够理想。经培养条件优化发现优化后沼泽红假单胞菌菌量仅有 5.6×10^8 cfu/mL^[10],经配方优化发现所得活菌数也仅有 12.5×10^8 cfu/mL^[11]。且传统的牛肉膏蛋白胨培养基中,成分价格较高且资源有限,而农副产品如糖蜜和工业级原料酵母浸膏则相对廉价且易于获取,可以作为微生物发酵的碳源和氮源^[12]。

菌株的生长需要适宜的培养条件和营养条件,培养条件包括发酵时长、温度、pH、转速和接种量等,营养条件包括碳源、氮源、无机盐和金属离子

等^[13-14],且营养物质的种类和比例,都会影响菌株的生长和发酵产物的产量^[15]。因此通过优化培养基组成和发酵条件,寻找菌体生长、基质消耗和产物生成三者的最佳发酵参数,以实现产品质量最好、产量最高、能耗最低、利润最高,将发酵控制在更高水平获得更佳的经济效益^[16]。常用的优化方法有单因素实验法、正交实验法、爬坡实验法和响应面法等^[17]。有效活菌数和菌悬液 OD₆₀₀ 值是决定微生物菌剂品质和产量的关键指标^[18],因此准确测量发酵液中活菌数和菌悬液 OD₆₀₀ 值对于衡量发酵效率具有重要意义。

目前,已有大量关于微生物发酵工艺优化的研究报道。如:吴海霞等^[19]采用单因素和正交实验法对海洋解淀粉芽孢杆菌 GM-1-1 进行发酵条件优化使芽孢产量显著提升;张红艳等^[20]对地衣芽孢杆菌 MYS68 进行培养基配方优化,显著提高了发酵液中活菌数和芽孢率;陈燕萍等^[21]对青枯雷尔氏菌 FJAT-1458 进行培养基优化,提高发酵效率的同时降低了生产成本;何明川等^[22]对烟草黑胫病病原菌烟草寄生疫霉 D5-8 进行发酵优化,使其对烟草黑胫病的保护防效和治疗防效显著提升。然而,目前对于韩国假单胞菌的发酵培养条件或配方优化研究尚少,且对优化后的发酵产物的田间应用效果研究还未见报道。因此,本研究拟以 GS 发酵滤液为研究对象,以发酵液中活菌数和菌悬液 OD₆₀₀ 值为评价指标,采用单因素和正交实验方法对韩国假单胞菌的发酵条件和培养基进行筛选优化,使用农副产品糖蜜、工业级原料酵母浸膏和硫酸镁按比例替换牛肉膏蛋白胨液体培养基的碳源、氮源和无机盐组分,旨在降低发酵成本、提高发酵效率。玉米是我国重要的粮食作物,在农业生产中的地位日益重要。基于此,本研究选择玉米为材料,进一步将优化后的 GS 发酵滤液应用于田间试验,验证发酵产品的实际应用效果,以期为后续 GS 的产业化高效发酵和应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试菌株为韩国假单胞菌 *P. koreensis* GS, NCBI 登记号为 PRJNA517377,在黑龙江省桃山天德人参有限公司人参基地分离纯化获得,由西北农林科技大学资源环境学院微生物资源研究室保藏。

牛肉膏蛋白胨液体培养基(NB)用于细菌的液体发酵培养,该培养基成分如下:牛肉膏 3 g,蛋白胨 10 g, NaCl 5 g,蒸馏水(DW) 1 000 mL, pH 7.2~7.5。牛肉膏蛋白胨固体培养基(NA)用于细菌 GS 的稀释涂布计数,成分如下:牛肉膏 3 g,蛋白胨 10 g, NaCl 5 g, DW 1 000 mL,琼脂 20 g, pH 7.2~7.5。

供试玉米品种为‘中垦玉 55 号’,购于甘肃农垦良种有限责任公司。

1.2 试验设计

1.2.1 发酵工艺优化试验

1)发酵条件单因素优化。选用 NB 作为基础培养基,通过单因素试验对时长(12、18、24、30、36 h)、温度(26、28、30、32、34 ℃)、pH(5、6、7、8、9)、接种量(0.02%、0.10%、0.50%、2.5%、12.5%)、转速(140、160、180、200、220 r/min)共 5 个条件进行筛选优化。具体操作方法:试验选用容量为 250 mL 的玻璃材质三角瓶,每瓶装液 100 mL。初始发酵条件为:时长 24 h,温度 28 ℃,pH 7.0,接种量 0.1%,转速 180 r/min 密封培养,培养结束使用分光光度计测定菌悬液的 OD₆₀₀ 值。每次试验中单因素条件之外的其他培养条件均与初始条件保持一致。

2)培养基组分单因素优化。采用优化后的发酵条件,通过单因素试验对碳源(柠檬酸,甘油,葡萄糖,糖蜜,牛肉膏)、氮源(尿素,氯化铵,硝酸钾,酵母浸膏,蛋白胨)、无机盐(氯化钠,氯化钾,磷酸氢二钠,磷酸氢二钾,硫酸镁)3 个培养基组分进行筛选优化。初始培养基配方为:牛肉膏 3 g/L,蛋白胨 10 g/L,氯化钠 5 g/L。培养结束使用分光光度计测定菌悬液的 OD₆₀₀ 值。每次试验中单因素组分之外的其他培养基组分均与初始配方保持一致。

3)培养基组分正交优化。通过 L₉(3³)正交设计试验进一步对培养基组分进行优化,即选用廉价农副产品糖蜜按照一定比例替换牛肉膏来充当碳源,选用廉价工业级酵母浸膏按照一定比例替换蛋白胨来充当氮源,选用高效的硫酸镁按照一定比例替换氯化钠来充当无机盐,因素水平设置见表 1。培养结束使用分光光度计测定菌悬液的 OD₆₀₀ 值。

4)培养基浓度正交优化。通过 L₉(3³)正交设计试验对优化后培养基中碳源、氮源和无机盐进行浓度优化,因素水平设置见表 2。培养结束使用分光光度计测定菌悬液的 OD₆₀₀ 值。

表1 培养基组分优化的关键因素及其最佳水平组合筛选

Table 1 The key factors and optimal level combination screening for the optimization of medium components

水平 Standard	试验因素 Experimental factor		
	A:碳源配比	B:氮源配比	C:无机盐配比
	A: Carbon source ratio	B: Nitrogen source ratio	C: Inorganic salt ratio
I	1:1	1:1	1:1
II	1:2	1:2	1:2
III	0:1	0:1	0:1

注:A为*m*(牛肉膏):*m*(糖蜜);B为*m*(蛋白胨):*m*(酵母浸膏);C为*m*(氯化钠):*m*(硫酸镁)。下同。
Note: A, *m*(beef paste): *m*(molasses); B, *m*(peptone): *m*(yeast extract); C, *m*(sodium chloride):*m*(magnesium sulfate). The same below.

表2 培养基各组分最佳浓度筛选

Table 2 Optimal concentration screening of each component of medium g/L

水平 Standard	试验因素 Experimental factor		
	碳源浓度	氮源浓度	无机盐浓度
	Carbon source concentration	Nitrogen source concentration	Inorganic salt concentration
I	1	5	3
II	3	10	5
III	5	15	7

1.2.2 田间效果验证试验

试验于陕西省杨凌示范区陵东村(33°15′51″N, 108°4′3″E)所设大棚内进行,土壤类型为壤土。试验采取随机区组设计,每个小区3 m×3 m,小区之间间隔30 cm,每个小区种植60株玉米,株距30 cm,行距50 cm。

试验设置2个处理,对照组Con为浇灌稀释100倍的液体培养基,处理组GS为浇灌稀释100倍的GS发酵滤液。播种时间为2023年7月26日,浇灌3次相应处理液,时间分别为2023年7月26日、8月11日和8月26日,每株浇液量500 mL,收获时间为2023年10月26日,整个生长周期90 d。

1.3 指标测定方法

1.3.1 发酵菌量测定

待优化试验全部结束后,再次采用优化后条件组合,统一测定初始培养基、组分优化培养基和浓度优化培养基发酵培养的菌悬液OD₆₀₀值及其对应的单菌落数。分光光度法:设置灭菌操作后的液体培养基为对照组,将处理组的发酵菌悬液放于可见分光光度计中,测定波长在600 nm的OD₆₀₀值。稀释涂布计数法:菌液依次10倍稀释,涂布于固体培养基,显微镜下计算单菌落数。

1.3.2 玉米生物学指标测定

抽雄期随机选择9株长势一致的玉米,采集植株样品,用于株高、茎粗、分叶数、地上部鲜重/干重、地下部鲜重/干重、根长和根系活力指标的测定。成熟期收获时随机选择9株长势一致的玉米果穗,立即测定玉米棒长、棒径和千粒籽粒重量。

1.3.3 玉米品质指标测定

籽粒中全氮含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,AA3连续流动分析仪法测定,粗蛋白含量为全氮含量乘以系数6.25^[23];全磷含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,钼锑抗比色法测定^[24];全钾含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,火焰光度法测定^[25];全钙、铁、锌含量均采用HNO₃-HClO₄消煮,原子吸收分光光度法测定^[26];黄酮、总酚含量采用紫外分光光度法测定^[27];可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝紫外分光光度法测定^[28];可溶性糖、淀粉含量采用蒽酮法测定^[29]。

1.4 数据分析方法

采用SPSS 26进行方差分析和多重比较,使用最小显著性差异法(LSD)和独立样本T检验进行差异显著性分析,认定*P*<0.05时为差异显著。使用Origin 2021作图。

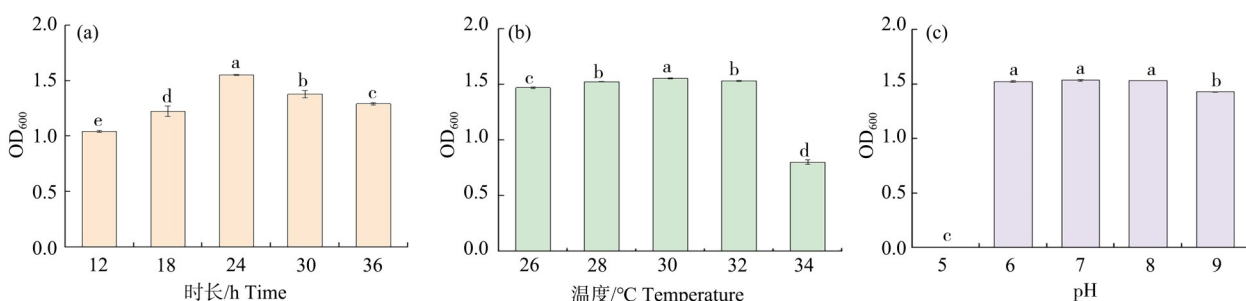
2 结果与分析

2.1 *P. koreensis* GS 发酵条件及培养基成分优化

2.1.1 发酵条件的单因素优化

将发酵条件中的时长、温度和培养基 pH 分别进行单因素试验,各处理中菌悬液的 OD₆₀₀ 值检测结果见图 1。可见:在发酵时长 24 h 和温度 30 °C

时 OD₆₀₀ 值达到最大值,且均显著高于其他处理。在 pH 为 7 时 OD₆₀₀ 值达到最大值,且发现在 pH 为 5 的酸性条件下菌株无法生长。同时,将发酵条件中的接种量和转速分别进行单因素试验,各处理中菌悬液的 OD₆₀₀ 值检测结果见图 2。可见:在接种量 0.5% 和转速 200 r/min 时 OD₆₀₀ 值达到最大值。



同一列数据不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母则表示差异不显著 ($P > 0.05$)。图 2 和图 3 同。

Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$), and the same letters indicate no significant differences ($P > 0.05$). Figs 2 and 3 are the same.

图 1 时长(a)、温度(b)和 pH(c)的单因素优化

Fig. 1 Single factor optimization results of duration (a), temperature (b) and pH (c)

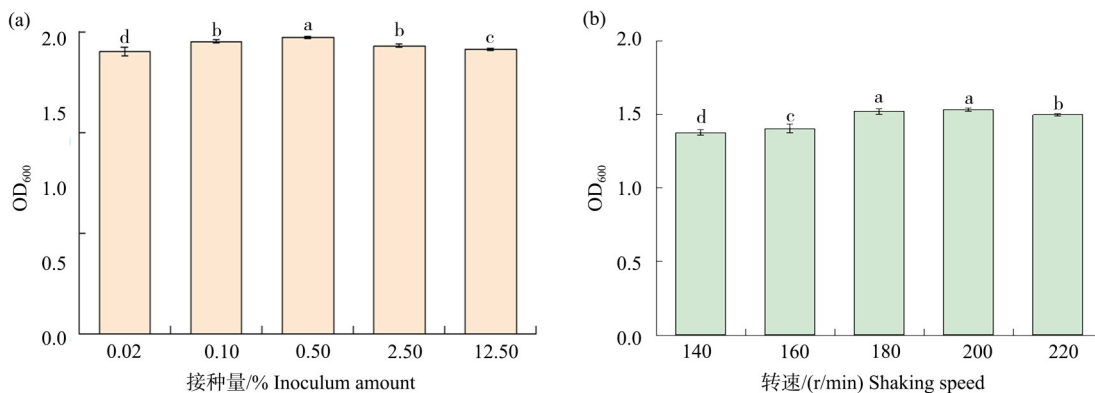


图 2 接种量(a)和转速(b)的单因素优化

Fig. 2 Single factor optimization results of inoculation amount (a) and shaking speed (b)

2.1.2 培养基组分的单因素优化

将培养基组分中的碳源、氮源和无机盐分别进行单因素试验,然后,培养结束后使用分光光度计,测定菌悬液的 OD₆₀₀ 值检测结果见图 3。可见:以牛肉膏为碳源、酵母浸膏为氮源和硫酸镁充当无机盐时 OD₆₀₀ 值分别为 1.52, 1.83 和 1.56, 均达到最大值,且均显著高于其他处理;而糖蜜为碳源、蛋白胨为氮源和氯化钠为无机盐时,效果次之。因此,本研究选用糖蜜、酵母

浸膏和硫酸镁,并将按照一定比例替换传统配方中的碳源、氮源和无机盐,探究最适培养液配方。

初始条件和最优发酵条件下分别采用稀释涂布法测得 GS 菌发酵液的活菌数结果见图 4。可见:初始条件下测得 GS 菌发酵液的活菌数为 1.65×10^{10} CFU/mL,而在最优发酵条件组合下测得其产生的活菌数可达 2.99×10^{10} CFU/mL,为初始条件下的 1.81 倍。

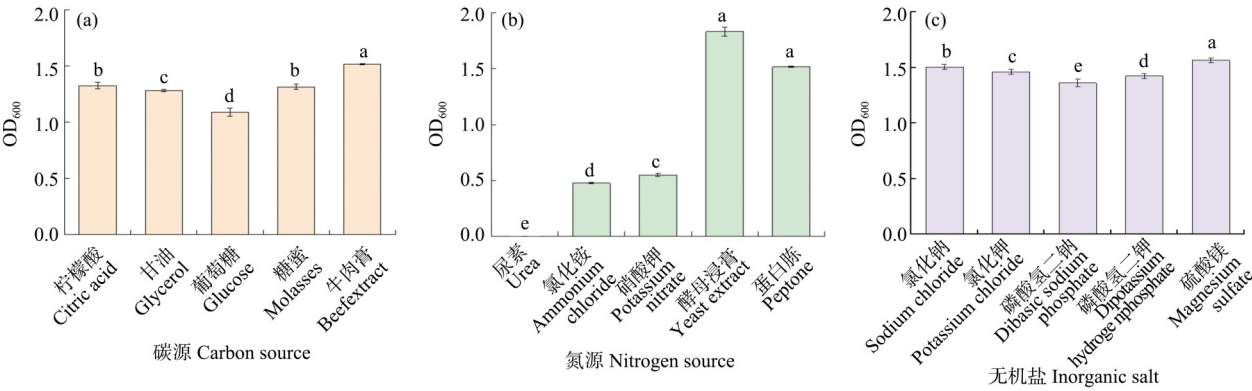


图3 碳源(a)、氮源(b)和无机盐(c)的单因素优化

Fig. 3 Single factor optimization results of carbon sources (a), nitrogen sources (b) and inorganic salts (c)

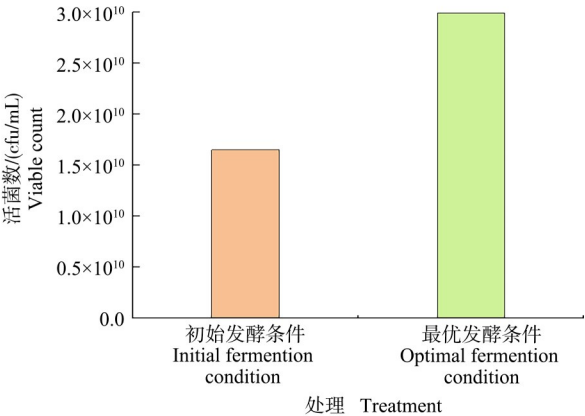


图4 不同发酵条件下GS菌发酵液的活菌数比较

Fig. 4 Comparison of viable bacteria number in fermentation filtrate of GS bacteria under different fermentation conditions

2.1.3 培养基组分和浓度的正交优化

将培养基组分采用正交设计试验进行优化,培养

结束后使用分光光度计,测定菌悬液的OD₆₀₀值检测结果见下表。由表3可见:碳源配比、氮源配比和无机盐配比3个因素对GS菌株生长的影响顺序为C>A>B,最佳培养基组分组合为A₁B₃C₂,即m(牛肉膏):m(糖蜜)=1:1、m(蛋白胨):m(酵母浸糖)=0:1、m(氯化钠):m(硫酸镁)=1:2。使用该最优配比组合发酵OD₆₀₀值达1.76,采用稀释涂布法测量其产生的活菌数可达7.52×10¹⁰ CFU/mL,为初始培养基发酵产生活菌数的2.52倍。由表4可见:碳源浓度、氮源浓度和无机盐浓度3个因素对GS菌株生长的影响顺序为A>B>C,最佳培养基浓度组合为A₃B₁C₂,即碳源5 g/L、氮源5 g/L、无机盐5 g/L。使用该最优浓度组合发酵OD₆₀₀值达1.89,采用稀释涂布法测量其产生的活菌数达1.38×10¹¹ CFU/mL,为浓度优化前发酵产生活菌数的1.84倍,为初始条件初始培养基发酵产生活菌数的8.36倍。

表3 培养基配方正交试验结果

Table 3 Result of orthogonal tests of medium formulations

试验号 Test number	碳源配比A Carbon source ratio	氮源配比B Nitrogen source ratio	无机盐配比C Inorganic salt ratio	OD ₆₀₀
1	1:1	1:1	1:1	1.718
2	1:1	1:2	0:1	1.603
3	1:1	0:1	1:2	1.756
4	1:2	1:1	0:1	1.656
5	1:2	1:2	1:2	1.681
6	1:2	0:1	1:1	1.699
7	0:1	1:1	1:2	1.698
8	0:1	1:2	1:1	1.702
9	0:1	0:1	0:1	1.450

表 4 培养基浓度正交试验结果

Table 4 Result of orthogonal tests of medium concentration

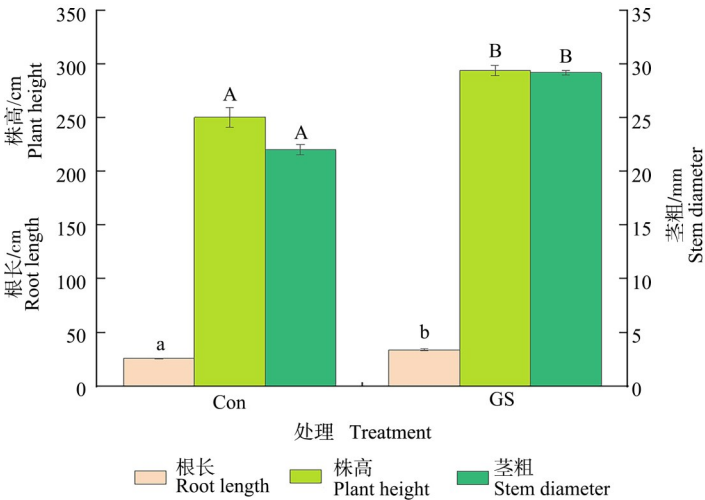
试验号 Test number	碳源浓度/(g/L) Carbon source concentration	氮源浓度/(g/L) Nitrogen source concentration	无机盐浓度/(g/L) Inorganic salt concentration	OD ₆₀₀
1	1	5	3	1.364
2	1	10	7	1.542
3	1	15	5	1.471
4	3	5	7	1.615
5	3	10	5	1.617
6	3	15	3	1.561
7	5	5	5	1.626
8	5	10	3	1.551
9	5	15	7	1.362

2.2 优化后的 *P. koreensis* GS 发酵滤液提质促生效果的大田验证

2.2.1 对玉米生物学指标的作用效果

由图 5 可见:与 Con 组相比,GS 处理组玉米的根长、株高和茎粗分别增加 31.75%、17.28% 和 32.64%。由图 6 可见:与 Con 组相比,GS 处理组

玉米的茎叶干重、茎叶鲜重、根系干重和根系鲜重分别增加 32.64%、35.13%、40.65% 和 25.38%。由图 7 可见,玉米的分叶数量、根系活力和玉米棒长分别增加 6.35%、37.82% 和 11.45%。因此,GS 处理可以有效促进玉米的生长和生物量的积累。



对照组 Con 为浇灌稀释 100 倍的液体培养基;处理组 GS 为浇灌稀释 100 倍的 GS 发酵滤液。柱子上方不同的小写字母代表不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$);不同的大写字母代表差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

Con represents control group irrigated with 100 times diluted liquid culture medium, and GS represents treatment group irrigated with 100 times diluted fermentation liquid. Different lowercase letters above the column represent significant differences between different two treatments ($P < 0.05$), and different capital letters represent extremely significant differences ($P < 0.01$). The same below.

图 5 不同处理对玉米根长、株高和茎粗的影响

Fig. 5 The effects of different treatments on maize root length, plant height and stem diameter

2.2.2 对玉米品质指标的作用效果

由表 5 可见:与 Con 组相比,GS 处理组玉米千粒籽粒中全磷、钙和淀粉含量分别增加 30.19%、60.82%

和 31.67%,全氮、黄酮和粗蛋白含量分别增加 9.93%、51.85% 和 10.01%,全钾、铁、锌、总酚、可溶性糖和可溶性蛋白含量分别增加 17.05%、7.56%、11.66%、

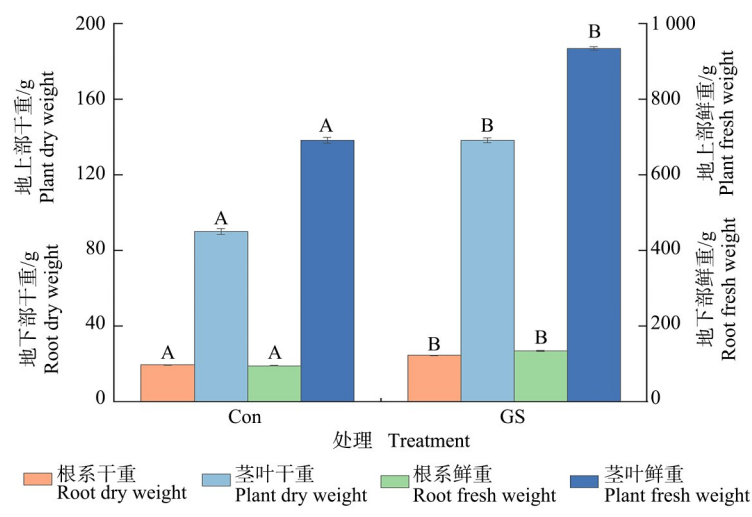


图6 不同处理对根系干重、茎叶干重、根系鲜重和茎叶鲜重的影响

Fig. 6 The effects of different treatments on corn root dry weight, plant dry weight, root fresh weight, and plant fresh weight

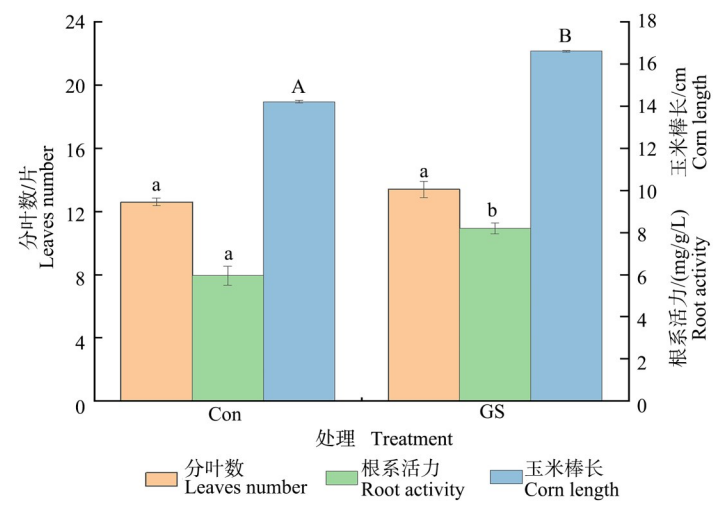


图7 不同处理对分叶数、根系活力和玉米棒长的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on corn leaves number, root activity and corn length

表5 不同处理对玉米籽粒养分含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on the nutrient content of corn kernels

处理 Treatment	全氮/g Total nitrogen	全磷/g Total phosphorus	全钾/g Total potassium	钙/mg Calcium	铁/mg Ferrum	锌/mg Zinc
Con	2.72±0.06a	0.53±0.01A	0.88±0.02	36.06±2.37A	11.78±0.54	4.03±0.13
GS	2.99±0.07b	0.69±0.01B	1.03±0.04	57.99±0.73B	12.67±0.52	4.50±0.11

处理 Treatment	黄酮/g Flavone	总酚/g Total phenolic	可溶性糖/g Soluble sugar	可溶性蛋白/g Soluble protein	粗蛋白/g Crude protein	淀粉/g Amylum
Con	0.27±0.01a	0.90±0.02	7.29±0.12	1.22±0.04	16.99±0.35a	101.84±2.55A
GS	0.41±0.03b	0.93±0.06	8.25±0.29	1.30±0.05	18.69±0.43b	134.09±1.37B

注:表中数据为千粒玉米中养分的含量。
Note: In the table, the data are the contents of the nutrients in the thousand-grain corn.

3.33%、13.17%和6.56%。由此可得,GS处理可以有效促进玉米籽粒中营养物质的积累。

3 讨 论

微生物菌剂发酵过程中,微生物的生长情况与发酵条件和培养基配方密切相关。当培养基组分恰当、比例及浓度合适、发酵条件适宜时,更有利于菌株生长繁殖^[30]。因此,进行发酵条件和培养基配方优化对提高微生物菌剂的发酵效率、提高菌株活性有重要意义。本研究以节约成本、提高效率为出发点,使用农副产品糖蜜、工业级酵母浸膏和硫酸镁按照一定比例替换传统培养基中的碳源、氮源和无机盐,通过多次单因素和正交设计试验对GS的发酵条件和培养基配方进行优化,最后确定了经济高效的发酵方案,为产业化生产提供了理论和技术支撑。

本研究发现,与初始发酵条件相比,在适当高的温度、接种量和转速条件下GS的生长效果更好,发酵效率更高。GS的最适发酵温度为30℃,最适转速为200 r/min,分析原因可能为GS是一类好氧细菌,转速适当加快可以增加摇瓶中的氧气含量,加之温度的适当升高,更利于GS的呼吸代谢^[31],加快菌株的生理代谢过程,从而更利于其生长繁殖。最适接种量为0.5%,分析原因可能为适当高的接种量会使发酵前培养液中的菌株基数更大,更利于发酵过程中菌株扩繁速度。而最适发酵时长相较于优化前没有变动,仍然是24 h,分析原因为过短的时间菌株仍然处在生长繁殖阶段,在第24 h菌量达到峰值。超过24 h菌量又随时间的延长逐渐减少,推测其原因,可能是由于GS生长到一定阶段后会进行自溶,导致其逐渐衰退,菌量逐渐减少^[32]。

经验证,与初始培养基配方相比,加入一定比例糖蜜、酵母浸膏和硫酸镁分别充当碳源、氮源和无机盐,GS的生长繁殖效果更好。推测其原因,可能是由于牛肉膏和蛋白胨纯度较高,包含养分种类较为单一,而农副产品糖蜜和工业级酵母浸膏未经高度提纯处理,其中含有的养分种类更加丰富,从而更利于GS获取营养^[33]。酵母浸膏除蛋白质含量较高外,还可能含有较多的氨基酸、多肽及某些生长因子,能促进GS菌株的生长和代谢^[34]。硫酸镁中镁离子可作为微生物生长的重要养分,参与碳水化合物化合物的新陈代谢及核酸的合成等^[35]。且在加入

镁离子的培养基中,菌体的生长量和发酵液的絮凝活性会处于较高水平^[36],因此发酵效率更高。因此,使用农副产品糖蜜、工业级酵母浸膏和硫酸镁按比例充当培养基组分在降低成本的同时,提高了菌剂的发酵效率。

已有研究表明,采用单因素试验和正交试验对发酵条件和培养基配方进行优化,可以有效提高铜绿假单胞菌ZM-1^[37]、沼泽红假单胞菌^[38]、施氏假单胞菌NRCB010^[39]、贝莱斯芽孢杆菌SH-1471^[40]、枯草芽孢杆菌HMQ20YJ04^[41]和短小芽胞杆菌Y26^[42]等菌剂的液体发酵效率。本研究中,使用最佳GS液体发酵方案可显著提高发酵所获菌量,为优化前的8.36倍,这与已有研究结果一致。但是,本研究仍存在些许不足,如研究仅局限于实验室进行了细菌GS的发酵工艺优化,后续还需要采用优化后的发酵方案进行小试、中试放大试验及工艺优化,进一步提高发酵效率,实现产业化生产。

在GS液体发酵工艺优化基础之上,通过田间玉米试验验证优化后GS发酵滤液的实际应用效果,对后续GS发酵产品的田间应用、促进种植业发展具有重要意义。本研究发现,优化后的GS发酵滤液具有显著促进玉米生长且提高品质的效果。分析原因可能是发酵滤液中含有丰富的GS次级代谢产物,如氨基酸、有机酸、杂环化合物、辅酶和维生素、吡啶及其衍生物等化合物和生长素、细胞分裂素、乙烯类、赤霉素等植物激素^[6],这些物质均能促进玉米的生长。其中根系的良好发育会加速植株获取养分和水分,进而提高玉米的地上、地下部分生物量和果实中的营养物质含量,如全氮、全磷、钙、黄酮、粗蛋白、淀粉和可溶性物质等,这些物质与果实营养价值和口感风味有直接关系^[43],因此GS发酵滤液可以显著提升籽粒品质。籽粒品质是衡量肥效的重要指标^[44],因此可得GS发酵滤液具有很大的应用前景,具有可代替部分化肥的潜力,从而提高作物的生产效率和品质。

4 结 论

本研究以GS发酵滤液为研究对象,探究了*P. koreensis* GS液体发酵工艺优化后的最佳发酵方案,主要结论如下:1)最佳培养基配方为:碳源使用*m*(牛肉膏):*m*(糖蜜)=1:1.5 g/L;氮源使用酵母浸膏,5 g/L;无机盐使用*m*(氯化钠):*m*(硫酸镁)=1:

2,5 g/L。2)最佳发酵条件为时长24 h,温度30℃, pH 7,接种量0.5%,转速200 r/min。3)使用该发酵方案所获的活菌数为优化前的8.36倍,生产成本可节省约30%~40%。且使用优化后的*P. koreensis* GS发酵滤液可以显著促进田间玉米茎叶生长、根系发育和植株生物量积累,增加籽粒中全氮、全磷、钙、黄酮、粗蛋白和淀粉等营养物质的积累,提升产量和品质。

参考文献 Reference

- [1] 李馨宇,米刚,Евгения Валерьевна Банецкая. 土壤微生物资源在农业中的应用[J]. 农业工程技术, 2023, 43(1): 107-108
Li X Y, Mi G, Евгения В Б. Application of soil microbial resources in agriculture[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2023, 43(1): 107-108 (in Chinese)
- [2] Vassileva M, Malusà E, Sas-Paszt L, Trzcinski P, Galvez A, Flor-Peregrin E, Shilev S, Canfora L, Mocali S, Vassilev N. Fermentation strategies to improve soil bio-inoculant production and quality [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(6): 1254
- [3] 赵倩,任广伟,王杰,王新伟,韦建玉,王晓强,卢燕回,陈信,王静. 施用韩国假单胞菌(*Pseudomonas koreensis*)CLP-7对连作烟田土壤质量及微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5357-5366
Zhao Q, Ren G W, Wang J, Wang X W, Wei J Y, Wang X Q, Lu Y H, Chen X, Wang J. Effects of adding *Pseudomonas koreensis* CLP-7 on soil quality and soil microbial community functional diversity in continuous cropping tobacco fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5357-5366 (in Chinese)
- [4] 罗志威. 烟草疫霉菌拮抗菌的筛选及其生物有机肥的制备[D]. 长沙:湖南农业大学, 2023
Luo Z W. Screening of antagonistic strain against *phytophthora nicotianae* and preparation of biological organic fertilizer[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [5] 石孟迪. *Pseudomonas koreensis* GS促生作用及密旋链霉菌Act12调节其生防功效的分子机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019
Shi M D. Study on the growth-promoting effect of *Pseudomonas koreensis* GS and the molecular mechanism of *Streptomyces densiflora* Act12 regulating its biocontrol effect [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019 (in Chinese)
- [6] Guo Q, Sun C Y, Jing Y X, Yang S S, Li H Y, Xue Q H, Lai H X. *Pseudomonas koreensis* culture filtrate alleviates tomato drought stress: Modulation of antioxidant systems coupled with the porphyrin and chlorophyll - photosynthesis - fructose and mannose axis[J]. *Plant and Soil*, 2023, 484(1): 237-256
- [7] 杨姗姗. 韩国假单胞菌*Pseudomonas koreensis* GS对盐胁迫下番茄生长发育的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024
Yang S S. Effects of *Pseudomonas koreensis* GS on growth and development of tomato under salt stress[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024 (in Chinese)
- [8] Guo Q, Shi M D, Chen L, Zhou J H, Zhang L X, Li Y L, Xue Q H, Lai H X. The biocontrol agent *Streptomyces pactum* increases *Pseudomonas koreensis* populations in the rhizosphere by enhancing chemotaxis and biofilm formation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 144: 107755
- [9] Guo Q, Sun Y, Shi M, Han X, Jing Y, Li Y, Li H, Lai H X. *Pseudomonas koreensis* promotes tomato growth and shows potential to induce stress tolerance via auxin and polyphenol-related pathways [J]. *Plant and Soil*, 2021, 462(1): 141-158
- [10] 刘德海,陈国参,解复红,胡宜亮,周伏忠,马焕,庞向宇. 沼泽红假单胞菌发酵培养条件优化研究[J]. 饲料工业, 35(16): 43-47
Liu D H, Chen G C, Xie F H, Hu Y L, Zhou F Z, Ma H, Pang X Y. Study on optimization of fermentation conditions for *Rhodospseudomonas palustris*[J]. *Feed Industry*, 2014, 35(16): 43-47 (in Chinese)
- [11] 全亚玲,戴静,马力,郝葆青. 沼泽红假单胞菌培养基配方及培养条件优化实验研究[J]. 西南民族大学学报:自然科学版, 2012, 38(3): 383-386
Quan Y L, Dai J, Ma L, Hao B Q. Optimization of culturing conditions and medium component for *Rhodospseudomonas palustris*[J]. *Journal of Southwest Minzu University: Natural Science Edition*, 2012, 38(3): 383-386 (in Chinese)
- [12] Li Y J, Luo L R, Ding X X, Zhang X M, Gan S L, Shang C H. Production of tetramethylpyrazine from cane molasses by *Bacillus* sp T1TMP20[J]. *Molecules*, 2023, 28(6): 2640
- [13] 易文实. 黔产石斛内生细菌活性代谢物提取分析及抗菌机制研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2022
Yi W S. Extraction and analysis of active metabolites from endophytic bacteria of *Dendrobium* in Guizhou and study on antibacterial mechanism [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022 (in Chinese)
- [14] Wan S T, Liu X, Sun W T, Lv B, Li C. Current advances for omics-guided process optimization of microbial manufacturing[J]. *Bioresources and Bioprocessing*, 2023, 10(1): 30
- [15] 乔俊卿,孙凯,刘永锋,陈夕军,刘鄯洲. 芽胞杆菌工程菌株B9BD产表面活性素发酵培养基优化[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(2): 383-392
Qiao J Q, Sun K, Liu Y F, Chen X J, Liu Y Z. Optimization of fermentation medium for the production of surfactin by engineered strain B9BD of *Bacillus subtilis* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(2): 383-392 (in Chinese)
- [16] Singh V, Haque S, Niwas R, Srivastava A, Pasupuleti M, Tripathi C K M. Strategies for fermentation medium optimization: An in-depth review [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 7: 2087
- [17] 王继莲,任羽,李明源. 响应面法优化假单胞菌产低温淀粉酶发酵培养基[J]. 生物学杂志, 2020, 37(4): 101-105
Wang J L, Ren Y, Li M Y. Medium optimization of cold-active amylase by *Pseudomonas* sp using response surface methodology [J]. *Journal of Biology*, 2020, 37(4): 101-105 (in Chinese)
- [18] 张敏,郑媛,赵玉洋,周骏辉,南铁贵,袁媛. 假单胞菌菌株ZL8发酵培养基及发酵条件的优化[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(22): 174-181
Zhang M, Zheng Y, Zhao Y Y, Zhou J H, Nan T G, Yuan Y. Optimization of culture medium and fermentation condition of *Pseudomonas* ZL8 [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2022, 28(22): 174-181 (in Chinese)
- [19] 吴海霞,陈茹,曹雪梅,李欢,暴增海,马桂珍,王军强,罗志会. 海洋细菌GM-1-1产芽孢发酵培养基和摇瓶发酵条件优化[J]. 南方农业学报, 2018, 49(12): 2454-2462
Wu H X, Chen R, Cao X M, Li H, Bao Z H, Ma G Z, Wang J Q, Luo Z H. Optimization of fermentation medium for spore production and flask-shaking fermentation conditions of marine bacteria GM-1-1[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(12): 2454-2462 (in Chinese)
- [20] 张红艳,李忠玲,张强,胡云红,付博,岳淑宁. 地衣芽孢杆菌MYS68的鉴定及发酵培养基优化[J]. 粮食与饲料工业, 2018(2): 50-53
Zhang H Y, Li Z L, Zhang Q, Hu Y H, Fu B, Yue S N. Identification

- and optimization of fermentation medium for *Bacillus licheniformis* MYS68[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2018(2): 50-53 (in Chinese)
- [21] 陈燕萍, 肖荣凤, 刘波, 朱育菁, 郑雪芳, 陈德局. 青枯病植物疫苗生产菌 FJAT-1458 发酵工艺的优化[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(1): 81-88
- Chen Y P, Xiao R F, Liu B, Zhu Y J, Zheng X F, Chen D J. Culture optimization for fermentation of avirulent *Ralstonia solanacearum* strain FJAT-1458 used as plant vaccine against crop bacterial wilt[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35(1): 81-88 (in Chinese)
- [22] 何明川, 王志江, 谢永辉, 詹筱国, 柯昌磊, 李微杰, 张忠, 吴国星. 烟草黑胫病拮抗菌的筛选、鉴定及发酵条件优化[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(2): 428-439
- He M C, Wang Z J, Xie Y H, Zhan Y G, Ke C L, Li W J, Zhang Z, Wu G X. Screening, identification and fermentation conditions optimization of antagonistic bacterium against tobacco black shank [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(2): 428-439 (in Chinese)
- [23] 张英利, 许安民, 尚浩博, 马爱生. AA3 型连续流动分析仪测定土壤和植物全氮的方法研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(10): 128-132
- Zhang Y L, Xu A M, Shang H B, Ma A S. Determination study of total nitrogen in soil and plant by continuous flow analytical system [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(10): 128-132 (in Chinese)
- [24] 李朝英, 郑路. 流动分析仪同时快速测定植物全氮、全磷含量的方法改进[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (2): 336-342
- Li Z Y, Zheng L. Improvement of simultaneous and rapid determination of total nitrogen and total phosphorus in plants by flow analyzer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 336-342 (in Chinese)
- [25] 陶曙华, 龚浩如, 陈祖武, 陈英姿, 苗雪雪, 王洁敏. 微波消解-火焰光度法测定植物中全钾[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(10): 142-145
- Tao S H, Gong H R, Chen Z W, Chen Y Z, Miao X X, Wang J M. Determination of total potassium in plants samples by microwave digestion-flame photometry [J]. *Hubei Agricultural Science*, 2019, 58(10): 142-145 (in Chinese)
- [26] 张惠臣, 杨丽荣, 李立军. 植物果实中不同部位金属元素含量的 AAS 分析[J]. 内蒙古环境科学, 2007, 19(4): 45-47
- Zhang H C, Yang L R, Li L J. AAS analysis of metal element contents in different parts of plants fruits [J]. *Inner Mongolia Environmental Protection*, 2007, 19(4): 45-47 (in Chinese)
- [27] Shahzad A, Afzal S, Ahmad I. Spectrophotometric quantification of total phenol, flavonoid and alkaloid content and *in-vitro* investigation of antioxidant and cytotoxic potential of *Hippeastrum equestre* bulbs [J]. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2022, 56(9): 1263-1271
- [28] 杨静华. 考马斯亮蓝法测定苦荞麦中可溶性蛋白的含量[J]. 山西医药杂志, 2018, 47(2): 206-207
- Yang J H. Determination of soluble protein in Tartary buckwheat by caustic Coomassie brilliant blue method [J]. *Shanxi Medical Journal*, 2018, 47(2): 206-207 (in Chinese)
- [29] 赵铁鹏, 赵新勇. 植物体可溶性糖测定方法的优化[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 184-185
- Zhao Y P, Zhao X Y. Optimization of classical measuring method of soluble sugar in plant[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(4): 184-185 (in Chinese)
- [30] 谯天敏, 张静, 赵芳, 朱天辉. 铜绿假单胞菌发酵条件优化及抗菌物质研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 45-50
- Qiao T M, Zhang J, Zhao F, Zhu T H. Study on optimization of fermentation conditions of *Pseudomonas aeruginosa* and its antibacterial substances[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2014, 38(5): 45-50 (in Chinese)
- [31] Pascual J, Garcia-López M, Bills G F, Genilloud O. *Pseudomonas granadensis* sp nov, a new bacterial species isolated from the Tejada, Almjara and Alhama Natural Park, Granada, Spain [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2015, 65(Pt 2): 625-632
- [32] 谯天敏, 朱天辉, 李姝江. 铜绿假单胞菌 ZB27 的定植能力及对杂交竹梢枯病的防控作用[J]. 植物保护学报, 2011, 38(2): 133-138
- Qiao T M, Zhu T H, Li S J. Colonization of *Pseudomonas aeruginosa* ZB27 and its control effect on hybrid bamboo blight[J]. *Journal of Plant Protection*, 2011, 38(2): 133-138 (in Chinese)
- [33] 姚银娟. 微生物发酵与可持续绿色生产的关键策略[J]. 工业微生物, 2024, 54(2): 197-199
- Yao Y J. Key strategies for microbial fermentation and sustainable green production [J]. *Industrial Microbiology*, 2024, 54(2): 197-199 (in Chinese)
- [34] 曲远航, 郭庆港, 李社增, 宣立锋, 张晓云, 马平. 生防枯草芽孢杆菌 HMB19198 发酵培养基的筛选及优化[J]. 农药学报, 2022, 24(3): 509-519
- Qu Y H, Guo Q G, Li S Z, Xuan L F, Zhang X Y, Ma P. Screening and optimization of *Bacillus subtilis* HMB19198 fermentation medium [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2022, 24(3): 509-519 (in Chinese)
- [35] 张家星, 姚怡敏, 闫敏, 李磊, 张强, 杨治平, 史向远. 芽孢杆菌腐熟菌剂发酵工艺优化及促进果树枝条降解效果研究[J]. 中国果树, 2023(2): 62-67
- Zhang J X, Yao Y M, Yan M, Li L, Zhang Q, Yang Z P, Shi X Y. Optimization of fermentation process of *Bacillus* composting agent and its effect on promoting fruit branches degradation [J]. *China Fruits*, 2023(2): 62-67 (in Chinese)
- [36] 吴小杰, 何宁, 孙道华, 凌雪萍, 陈翠雪, 邓旭, 李清彪. 金属离子对生物絮凝剂 REA-11 合成的影响[J]. 工业微生物, 2006, 36(2): 48-51
- Wu X J, He N, Sun D H, Ling X P, Chen C X, Deng X, Li Q B. Effects of metal ions on production of bioflocculant REA-11 [J]. *Industrial Microbiology*, 2006, 36(2): 48-51 (in Chinese)
- [37] 魏靖宇, 韩雨桐, 翟文旭, 卫勇, 李宝通, 刘慧芹. 黄泥土传病害拮抗细菌的筛选、鉴定及生防特性研究[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(6): 1582-1591
- Wei J Y, Han Y T, Zhai W X, Wei Y, Li B T, Liu H Q. Screening, identification and biocontrol characteristics of antagonistic bacteria against cucumber soil-borne diseases [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(6): 1582-1591 (in Chinese)
- [38] 杨传伦, 张心青, 马春峰, 王秀芝, 李佳明, 杨丹丹. 一株沼泽红假单胞菌发酵培养基优化、放大及应用[J]. 天津农业科学, 2021, 27(11): 7-12
- Yang C L, Zhang X Q, Ma C F, Wang X Z, Li J M, Yang D D. Optimization, amplification and application of fermentation medium for *Rhodopseudomonas palustris* [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(11): 7-12 (in Chinese)
- [39] 李珊珊, 郑东辉, 刘柠, 陶文轩, 张欢欢, 高南. 施氏假单胞菌 NRCB010 的高密度发酵条件优化[J]. 中国土壤与肥料, 2023(11): 229-240
- Li S S, Zheng D H, Liu N, Tao W X, Zhang H H, Gao N. Optimization of high-density fermentation conditions for *Pseudomonas stutzeri* NRCB010 [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(11): 229-240 (in Chinese)
- [40] 申云鑫, 施竹凤, 李铭刚, 赵江源, 王楠, 冯路遥, 莫艳芳, 陈齐斌, 杨佩文. 贝莱斯芽孢杆菌 SH-1471 发酵条件优化及其番茄枯萎病的防治效果

- [J]. 微生物学报, 2024, 64(1): 220-237
- Shen Y X, Shi Z F, Li M G, Zhao J Y, Wang N, Feng L Y, Mo Y F, Chen Q B, Yang P W. *Bacillus velezensis* SH-1471: Optimization of fermentation conditions and evaluation of the biocontrol effect on tomato *Fusarium* wilt[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2024, 64(1): 220-237 (in Chinese)
- [41] 张金奎, 徐生军, 李继平, 马娅楠, 荆卓琼, 郭致杰, 郑果. 生防细菌 HMQ20YJ04 发酵条件优化及其对番茄灰霉病的效果评价[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(6): 1418-1433
- Zhang J K, Xu S J, Li J P, Ma Y N, Jing Z Q, Guo Z J, Zheng G. Optimization of fermentation conditions of biocontrol bacteria HMQ20YJ04 and evaluation of its effect on *Botrytis cinerea*[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39(6): 1418-1433 (in Chinese)
- [42] 梅凤珍, 周明超, 杨丹, 李香凤, 孔令安, 刘建斌, 史凤玉. 生防菌 Y26 的鉴定、发酵优化及其杀线虫活性测定[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(2): 424-434
- Mei F Z, Zhou M C, Yang D, Li X F, Kong L A, Liu J B, Shi F Y. Identification, fermentation optimization and determination of nematicidal activity of biocontrol bacterium Y26[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40(2): 424-434 (in Chinese)
- [43] Zapata-Sifuentes G, Hernandez-Montiel L G, Saenz-Mata J, Fortis-Hernandez M, Blanco-Contreras E, Chiquito-Contreras R G, Preciado-Rangel P. Plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and fruit quality of cucumber under greenhouse conditions[J]. *Plants*, 2022, 11(12): 1612
- [44] Nguyen T N, Tang L H, Peng Y K, Ni J Y, Chang Y N. Effects of composite inorganic, organic fertilizer and foliar spray of multi-nutrients on growth, yield and quality of cherry tomato [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17: 1781-1788
- 责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 桑萌,西北农林科技大学硕士研究生。参与申请并获批国家专利“盐碱土分离的细菌及应用”(专利号 ZL202111675593.8)一项,参与内蒙古自治区科技项目、内蒙古鄂尔多斯重点项目、陕西省咸阳市秦创原科技创新项目的部分工作,在校期间连续三年获得研究生专业奖学金。



通讯作者简介: 来航线,西北农林科技大学教授,博士生导师。中国植物营养与肥料学会委员,陕西省微生物学会理事,陕西省农用微生物科技创新联盟副理事长。主要研究方向为微生物生态及退化土壤生物修复。主持国家重点研发、科技支撑计划及农业部行业专项 15 项,国内外期刊发表论文 100 余篇,其中在 *Soil Biology and Biochemistry*, *Biology and Fertility of Soils*, *Applied Soil Ecology* 等杂志发表 SCI 论文近 30 篇;获科技成果奖共 7 项(陕西省科技进步一等奖,排名第 4;农业部中华农业奖,排名第二);申报发明专利 15 件;主编和副主编教材和论著 5 部。