2026, 66(10): 5025-5037
CSTR: 32112.14.j.AMS.20260197
DOI: 10.13343/j.cnki.wsxb.20260197

微生物学报
Acta Microbiologica Sinica
http://journals.im.ac.cn/actamicrocn

Research Article 研究报告

玉米禾谷镰孢茎腐病生防菌株的筛选鉴定及其防治效果

王紫宸[1,2#]，王黎明[2#]，李时宇[2]，张康[1,2]，曹宏哲[2]，邢继红[1,2*]，董金皋[1,2*]

1 河北农业大学，华北作物改良与调控国家重点实验室，河北 保定
2 河北省植物生理与分子病理学重点实验室，河北 保定

王紫宸, 王黎明, 李时宇, 张康, 曹宏哲, 邢继红, 董金皋. 玉米禾谷镰孢茎腐病生防菌株的筛选鉴定及其防治效果[J]. 微生物学报, 2026, 66(10): 5025-5037.
WANG Zichen, WANG Liming, LI Shiyu, ZHANG Kang, CAO Hongzhe, XING Jihong, DONG Jingao. Screening, identification, and control efficacy evaluation of biocontrol strains against maize stalk rot caused by *Fusarium graminearum*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(10): 5025-5037.

摘　要：玉米作为我国重要的粮食作物，其产量直接关系国家粮食安全。近年来，受气候变化和耕作模式改变的影响，玉米茎腐病已经成为我国玉米生产的主要威胁。【目的】筛选鉴定抗玉米茎腐病的生防菌株，明确其最佳发酵工艺，并开发为高效菌剂，为构建新型绿色防控技术体系提供理论支撑与物质基础。【方法】结合稀释涂布法与平板对峙法筛选禾谷镰孢(*Fusarium graminearum*)的拮抗菌株；结合生理生化特征与分子生物学手段对目标菌株进行物种鉴定；通过单因素试验优化菌株发酵条件，并研制生防菌株种衣剂；利用室内盆栽与室外田间小区试验，系统评价生防菌株种衣剂对玉米生长发育的促进作用及对玉米茎腐病的防治效果。【结果】成功筛选出 2 株对禾谷镰孢抑制率达 70.00% 左右的生防菌株 HS104 和 HS107，经鉴定 2 株菌均为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)。2 株菌对多种玉米主要病原菌[拟轮枝镰孢(*Fusarium verticillioides*)、尖孢镰孢(*Fusarium oxysporum*)及玉蜀黍平脐蠕孢(*Bipolaris maydis*)]表现出拮抗活性，抑菌率均在 60.00% 左右。经发酵条件优化后，室内盆栽试验表明 HS104 和 HS107 不仅显著促进玉米生长，且对茎腐病的防效分别达到 75.00% 和 71.00%。基于此研发的生防种衣剂在田间试验中表现优异，不仅显著促进玉米生长，对茎腐病的防效分别达到 63.93% 和 77.33%；且感病植株的产量较对照分别提高 8.20% 和 9.20%。【结论】菌株 HS104 和 HS107 兼具广谱抑菌、强促生及高效防病

资助项目：河北省高等学校科学技术研究项目(CXZX2026057)；保定市科技计划(2494N032)；国家玉米产业技术体系(CARS-02-30)；河北省省级科技计划(24466301D)
This work was supported by the Science and Technology Research Project of Colleges and Universities in Hebei Province (CXZX2026057), the Baoding Science and Technology Planning (2494N032), the Earmarked Fund for CARS (CARS-02-30), and the Science and Technology Program of Hebei Province (24466301D).
#These authors contributed equally to this work.
*Corresponding authors. E-mail: XING Jihong, xingjihong2000@126.com; DONG Jingao, dongjingao@126.com
Received: 2026-03-10; Accepted: 2026-04-08; Published online: 2026-05-07

等多重优良特性，在玉米茎腐病生物防治及增产提质方面具有广阔的应用前景。

关键词： 玉米茎腐病；禾谷镰孢；贝莱斯芽孢杆菌；种衣剂；生物防治

Screening, identification, and control efficacy evaluation of biocontrol strains against maize stalk rot caused by *Fusarium graminearum*

WANG Zichen[1,2#], WANG Liming[2#], LI Shiyu[2], ZHANG Kang[1,2], CAO Hongzhe[2], XING Jihong[1,2*], DONG Jingao[1,2*]

1 State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei, China

2 Key Laboratory of Plant Physiology and Molecular Pathology, Baoding, Hebei, China

Abstract: Maize, an important food crop in China, directly affects national food security. In recent years, due to climate change and shifts in farming practices, maize stalk rot has become a major threat to maize production in China. **[Objective]** To screen and identify biocontrol bacterial strains against maize stalk rot, determine their optimal fermentation process, and develop effective bacterial agents, thereby providing theoretical support and a material basis for constructing a novel green prevention and control technology system. **[Methods]** Antagonistic bacterial strains against *Fusarium graminearum* were screened through a combination of dilution coating and plate confrontation methods. Candidate strains were identified through molecular biological techniques combined with physiological and biochemical characterization. Fermentation conditions were optimized *via* single-factor experiments, and seed coating agents were developed with the selected biocontrol bacteria. Indoor pot experiments and outdoor field plot trials were carried out for the biocontrol bacteria to systematically evaluate their maize growth-promoting effects and control efficacy against maize stalk rot. **[Results]** Two biocontrol strains, HS104 and HS107, with inhibition rates of approximately 70.00% against *F. graminearum*, were successfully screened out and identified as *Bacillus velezensis*. Both strains exhibited broad-spectrum antagonistic activity against major maize pathogens, including *F. verticillioides*, *F. oxysporum*, and *Bipolaris maydis*, with inhibition rates of around 60.00%. After optimization of fermentation conditions, indoor pot experiments showed that HS104 and HS107 not only significantly promoted maize growth but also achieved the control efficacy of 75.00% and 71.00% against maize stalk rot, respectively. The seed coating agents developed with the selected biocontrol bacteria performed well in field trials, significantly promoting maize growth and achieving the control efficacy of 63.93% and 77.33% against maize stalk rot, respectively. Moreover, they increased the yield of susceptible plants by 8.20% and 9.20%, respectively, compared with the control. **[Conclusion]** Strains HS104 and HS107 possess multiple excellent traits, including broad-spectrum antifungal activity, strong plant growth-promoting effects, and high disease control efficacy, demonstrating broad application

prospects in the biocontrol of maize stalk rot and the enhancement of crop yields.
Keywords: maize stalk rot; *Fusarium graminearum*; *Bacillus velezensis*; seed coating agent; biocontrol

玉米作为我国第一大粮食作物，其产量占全国粮食总产量的 40% 以上[1]，国家统计局数据显示，截至 2025 年，我国玉米种植面积已经连续 3 年增长，产量达到了 30 123.5 万 t[2]，创历史新高，对保障粮食安全和农业可持续发展具有重要战略地位。然而，玉米茎腐病作为全球玉米主产区普遍发生的重大土传病害，已成为制约玉米稳产高产的关键生物胁迫因素。自 20 世纪 70 年代以来，该病害在我国西南、华南、华东及西北等产区广泛流行，发病率通常为 5%−20%，重病田块可达 40%−60%，严重威胁玉米产量与经济效益。

该病害由多种病原真菌复合侵染引发，其中禾谷镰孢(*Fusarium graminearum*)是我国最主要的致病菌株[3]。该病原菌不仅导致植株倒伏、籽粒灌浆受阻[4]，其产生的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)等真菌毒素还会在谷物及青贮饲料中持续累积[5]，通过食物链威胁人畜健康，构成“从农田到餐桌”的全链条安全风险。

当前，玉米茎腐病的防控面临多重挑战。其中，抗病品种选育存在周期长、抗性易丧失等问题[6]；农业防治(如轮作、深耕)虽能降低病原菌基数，但成本高昂且难以根治；化学防治虽见效快，但长期过量使用已导致环境污染、病原菌抗药性增强及农产品毒素超标等新问题[7]。在此背景下，生物防治凭借其生态友好、作用机制多元、不易产生抗药性等优势成为病害绿色防控的重要发展方向[8]。

芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)因繁殖速度快、抗逆性强、代谢产物丰富(如脂肽类抗生素、酶类、挥发性物质等)，已成为生防微生物研发的热点[9]。近年来，贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)[10]、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)[11]及解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)[12]等在防治土传病害、促进植物生长及诱导系统抗性等方面展现出巨大潜力。例如，贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) Y6 和 F7 可分泌伊枯草菌素、丰原素和表面活性素，实现对青枯雷尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)和尖孢镰孢(*Fusarium oxysporum*)的双重防控；病原菌的存在可诱导脂肽合成，其不仅直接抑制病原菌，还通过促进生物膜形成和运动性增强根际定殖能力[13]。有研究表明，芽孢杆菌是抗性玉米品种抵御茎腐病的核心微生物类群，其通过生态位竞争、分泌抗菌物质、诱导宿主合成小檗碱等异喹啉生物碱 3 种机制协同防御；甚至无直接抑菌活性的芽孢杆菌也可通过上调宿主酪氨酸脱羧酶 1 (tyrosine decarboxylase 1, TYDC1)基因表达，激活代谢防御通路[14]。

本研究以禾谷镰孢为靶标，从玉米根际土壤中筛选高拮抗活性的细菌菌株，采用形态学观察与分子生物学技术(16S rRNA 基因测序、*rpoB* 基因系统发育分析)对其进行鉴定。通过发酵条件优化提升菌株活性物质产量，研制新型生防种衣剂，并经室内盆栽与大田试验评价其对玉米的促生作用(株高、茎粗、生物量)及对茎腐病的防控效果。本研究旨在为玉米茎腐病绿色防控提供新的菌种资源，为基于微生物组的病害综合治理策略开发提供关键技术支撑，对推动农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

‘郑单 958’玉米品种，购自河南秋乐种业科技股份有限公司。

禾谷镰孢(*Fusarium graminearum*)、拟轮枝镰孢(*Fusarium verticillioides*)、尖孢镰孢(*Fusarium oxysporum*)、玉蜀黍平脐蠕孢(*Busarium maydis*)，

均由河北省植物生理与分子病理学重点实验室保存并提供。

试验土壤采集自河北省衡水市玉米种植区，随机选取 3 株健康玉米植株，并按照 Wang 等[15]的方法收集根际土壤样品，于 4 ℃保存。

1.2 筛选生防菌株

采用稀释涂布平板法[16]从玉米根际土壤中分离纯化获得单菌落。以禾谷镰孢为靶标病原菌进行平板对峙试验。将直径 5.0 mm 的活化病原菌菌饼接种于 PDA 平板中央，候选细菌分别接种于距离病原菌 2.5 cm 的上下左右 4 个位置。以仅接种病原菌的平板为对照，设置 3 个重复，置于 27 ℃培养箱中培养。待对照平板菌落长满时测量对照组和处理组中病原真菌的菌落直径，抑制率计算如公式(1)所示。

$$\text{抑制率}=(\text{对照组病原真菌菌落直径}-\text{试验组病原真菌菌落直径})/\text{对照组病原真菌菌落直径}\times 100\% \quad (1)$$

根据抑制率结果筛选高效菌株进行复筛，并进一步以拟轮枝镰孢、尖孢镰孢、玉蜀黍平脐蠕孢为病原真菌，测定抑菌谱。

1.3 鉴定生防菌株

依据《常见细菌系统鉴定手册》[17]，对生防菌株进行菌落形态观察(如菌落颜色、质地、边缘特征)与生理生化特性分析(如碳源利用)，并进行初步分类。同时，采用 16S rRNA 基因和 *rpo*B 基因的特异性引物对菌株进行分子生物学鉴定。以菌株菌液为模板，分别使用 16S rRNA 基因的通用引物 27F (5′-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3′) 和 1492R (5′-GGTTACCTTGTTACGACTT-3′)，以及 *rpoB* 基因特异性引物 2292F (5′-GACGTGGGATGGCTACAACT-3′) 和 3354R (5′-ATTGTCGCCTTTAACGATGG-3′) 进行 PCR 扩增，反应体系及程序参照李志普[18]的优化方案。扩增产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测后，送北京擎科生物科技股份有限公司完成测序。序列通过 NCBI 数据库 BLAST 比对确定近缘种，下载相关同源序列后，利用 MEGA 7.0 软件进行多序列比对并构建系统发育树。

1.4 生防菌株的发酵条件优化

对生防菌发酵培养基的成分进行优化，微生物发酵培养基以 1.0% 葡萄糖(碳源)、1.0% 胰蛋白胨(氮源)和 0.5% 氯化钠(无机盐)为基础。优化试验中，分别用蔗糖、麦芽糖、玉米淀粉和可溶性淀粉作为替代碳源，用酵母浸粉、氯化铵、蛋白胨、黄豆饼粉和牛肉膏作为替代氮源，用硫酸铜、氯化钙、硫酸镁和氯化钾作为替代无机盐，通过不同组合筛选最优发酵培养基成分。

在此基础上，进一步对发酵条件进行优化。优化条件包括装液量(30、60、90、120、150 mL)、接种量(1%、2%、3%、4%、5% 种子液)、pH (5.0、6.0、7.0、8.0、9.0)、温度(31、34、37、40、43 ℃)、转速(140、160、180、200、220 r/min)、发酵时间(24、36、48、72 h)。每个条件均设置各梯度的单因素试验。

最后，基于单因素试验结果，选取培养基关键成分(如最优碳源、氮源、无机盐)作为三因素，采用三水平正交试验设计进行配比优化，通过极差分析与方差分析确定各成分的最佳配比。

1.5 生防菌株的室内盆栽试验

选取‘郑单 958’玉米种子(饱满均一)，经 5% NaClO 消毒后播种，置于 25 ℃、相对湿度 30%−45%、光照 12 h 的培养室中。试验设生防菌处理组与无菌培养基对照组，每处理 6−10 株重复。

待玉米出苗后，处理组分 2 次灌根施用 1×10^9 CFU/mL 的生防菌发酵液(50 mL/株)，对照组施等量无菌培养基。玉米 8 叶期时，测量株高、茎粗及鲜重以评估促生作用。10 叶期时，通过针刺法在茎基部接种 50 μL 禾谷镰孢分生孢子悬液(1×10^5 CFU/mL)。接种 7 d 后，剖茎调查发病情况，利用 ImageJ 软件测量病斑面积并统

计防效，防效计算如公式(2)所示。

$$防效=\frac{(对照组病斑面积-试验组病斑面积)}{对照组病斑面积}\times 100\% \quad (2)$$

1.6 生防菌种衣剂的研制

制备生防菌种衣剂需要对紫外保护剂和分散剂进行筛选。紫外保护剂在葡萄糖、蔗糖和山梨醇中筛选，分散剂以聚乙烯醇、多聚磷酸钠、CMC-Na、PEG 1000 为备选材料。将 1×10^9 CFU/mL 的生防菌悬液吸取 100 μL 涂布在含有不同成分的平板上，每个处理重复 3 次。平板置于 37 ℃培养箱培养 24 h 后，对各处理单菌落数量进行统计，选取菌落数最多的组合，分别确定为最佳紫外保护剂和最佳分散剂。随后，将筛选出来的分散剂、紫外保护剂按 3.0%、1.5% 的比例与 1×10^9 CFU/mL 生防菌悬液及载体混匀，然后与 25.0% 的成膜剂混合，2.5% 的鲜红 101 色浆为警戒色，以药种比 1:50 的比例与玉米籽粒混匀包衣，即完成种衣剂的制备。

1.7 生防菌种衣剂的田间试验

试验在河北农业大学河北省植物生理与分子病理学重点实验室试验田开展。以市售包衣‘郑单 958’种子为对照(CK)，生防菌包衣种子为处理组。玉米 8 叶期时，各处理选取 20 株测定株高与茎粗。10 叶期时，选取 30 株/处理进行针刺接种禾谷镰孢分生孢子悬液(1×10^5 CFU/mL)，伤口处覆膜保湿。接种 28 d 后，剖茎调查发病情况，利用 ImageJ 软件测量病斑面积并计算防治效果。

1.8 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 和 IBM SPSS Statistics 22 进行数据整理和统计分析，图表使用 GraphPad Prism 8.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 生防菌株的筛选

通过平板稀释涂布法，从玉米根际土壤中共分离获得 340 株候选细菌菌株。经平板对峙试验验证，菌株 HS104 和 HS107 对禾谷镰孢(*Fusarium graminearum*)的拮抗效果最为突出，抑制率分别达 69.85% 和 70.05%。广谱抑菌活性检测发现，2 株菌对多种玉米重要病原真菌均表现出显著抑制作用：对拟轮枝镰孢(*Fusarium verticillioides*)抑菌率分别为 61.15% 和 60.45%，对尖孢镰孢(*Fusarium oxysporum*)分别为 62.59% 和 62.88%，对玉蜀黍平脐蠕孢(*Bipolaris maydis*)分别为 60.97% 和 60.41% (图 1A、1B)。上述数据表明，HS104 和 HS107 不仅对禾谷镰孢具有强效抑制能力，其抑菌谱还覆盖了玉米生产中常见的多种土传及叶部病害病原菌，展现出优异的广谱抗真菌活性，具备作为多功能生防菌株的开发潜力。

2.2 生防菌株 HS104 和 HS107 的鉴定

形态观察显示，HS104 和 HS107 菌落呈近圆形、乳白色、不透明(图 2A、2B)。革兰氏染色均呈阳性，菌体呈杆状。培养特征表现为初期光滑隆起，后期塌陷褶皱并伴有气味释放。生理生化分析(表 1)显示，HS104 对甲基红试验、柠檬酸盐、硝酸盐、淀粉水解、葡萄糖利用及乳糖利用呈阳性，VP 试验、吲哚试验和硫化氢产生试验为阴性；HS107 则表现为甲基红试验、吲哚试验、柠檬酸盐利用、硝酸盐还原和葡萄糖分解为阳性，但 VP 试验、淀粉水解、硫化氢产生和乳糖利用为阴性。分子系统发育分析基于 16S rRNA 和 *rpoB* 基因序列构建，结果表明 HS104 和 HS107 与贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)聚为一支，具有极高的序列相似性(图 2C、2D)。综合菌落形态、生理生化特性及分子系统发育证据，最终将 HS104 和 HS107 鉴定为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)。

2.3 生防菌株 HS104 和 HS107 的发酵条件优化

生防菌株发酵培养基成分优化的单因素试验显示，HS104 的最适碳源为葡萄糖、氮源为

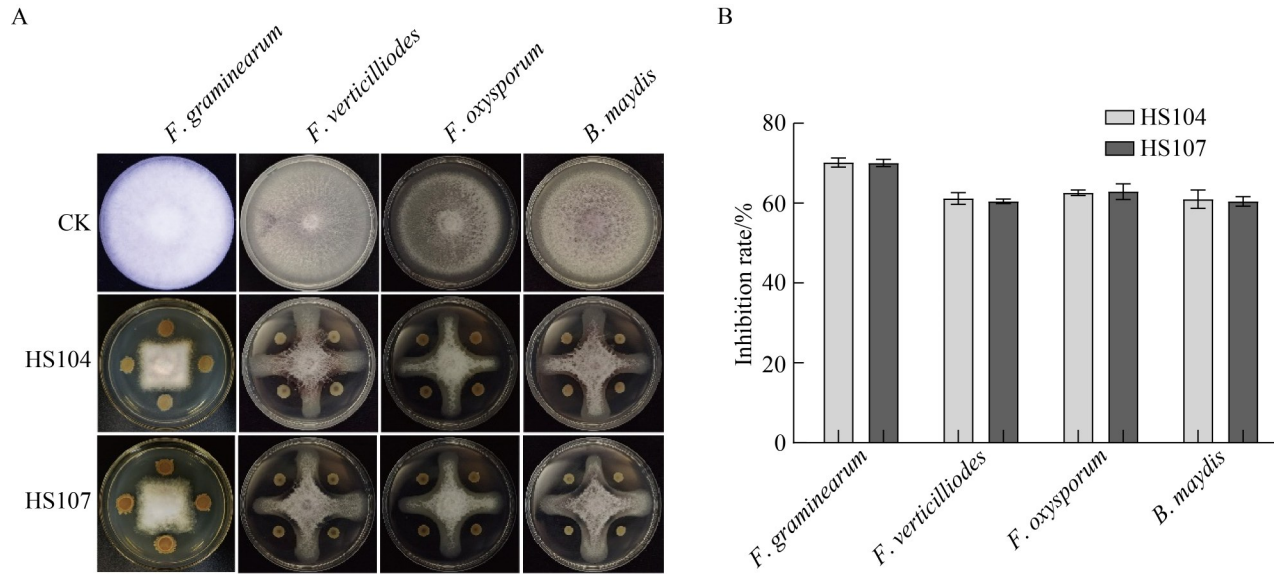


图1　HS104和HS107对禾谷镰孢及其他病原菌的平板抑制效果及抑菌率

Figure 1　Antagonistic effects and inhibition rates of strains HS104 and HS107 against *Fusarium graminearum* and other pathogenic fungi on plates. A: Antagonistic effects of biocontrol strains HS104 and HS107 against four pathogenic fungi of maize; B: Inhibition rates of biocontrol strains HS104 and HS107 against four pathogenic fungi of maize.

酵母浸粉、无机盐为氯化钙；HS107 的最适碳源为蔗糖、氮源为酵母浸粉、无机盐为氯化钙。进一步通过三因素三水平正交试验验证，确定 HS104 培养基的最佳配比为葡萄糖 1.0%、酵母浸粉 1.0%、氯化钙 0.1%，HS107 的最佳配比为蔗糖 5.0%、酵母浸粉 0.5%、氯化钙 0.1% (图 3A)。

最佳发酵条件筛选结果显示，2 株菌均在 37 ℃、pH 7.0 条件下表现出最佳发酵性能，发酵周期均为 24 h。HS104 的最佳发酵转速为 180 r/min、装液量 150 mL (250 mL 三角瓶)、接种量 4%；HS107 的最适转速为 200 r/min、装液量 120 mL (250 mL 三角瓶)、接种量 5% (图 3B)。

2.4　生防菌株 HS104 和 HS107 的室内防效

在温室盆栽试验中，生防菌株 HS104 和 HS107 展现出显著的促生与防病双重效果。经菌液处理后，玉米植株的株高、茎粗和鲜重均显著增加。与对照组相比，HS104 处理组株高提升 14.35%，茎粗增加 73.43%，地下部鲜重增长 46.84%，地上部鲜重提高 36.95%；HS107 处理组则表现为株高提升 16.06%，茎粗增加 79.72%，地下部鲜重激增 98.51%，地上部鲜重提升 70.28% (图 4A)。在病害防控方面，2 菌株处理显著抑制茎腐病发生，病斑面积明显缩小，防效分别达 75.00% (HS104)和 71.00% (HS107) (图 4B)。

2.5　生防菌株 HS104 和 HS107 种衣剂的制备

对生防菌株 HS104 和 HS107 进行种衣助剂的筛选，结果显示，山梨醇(3.0%)作为紫外保护剂可有效减少菌体紫外线损伤，PEG 1000 (1.5%)作为分散剂能确保菌体均匀分布(图 5A)。将上述助剂与 1.00×10^9 CFU/mL 的生防菌悬液充分混匀后，添加 25.0% 成膜剂(形成保护膜提

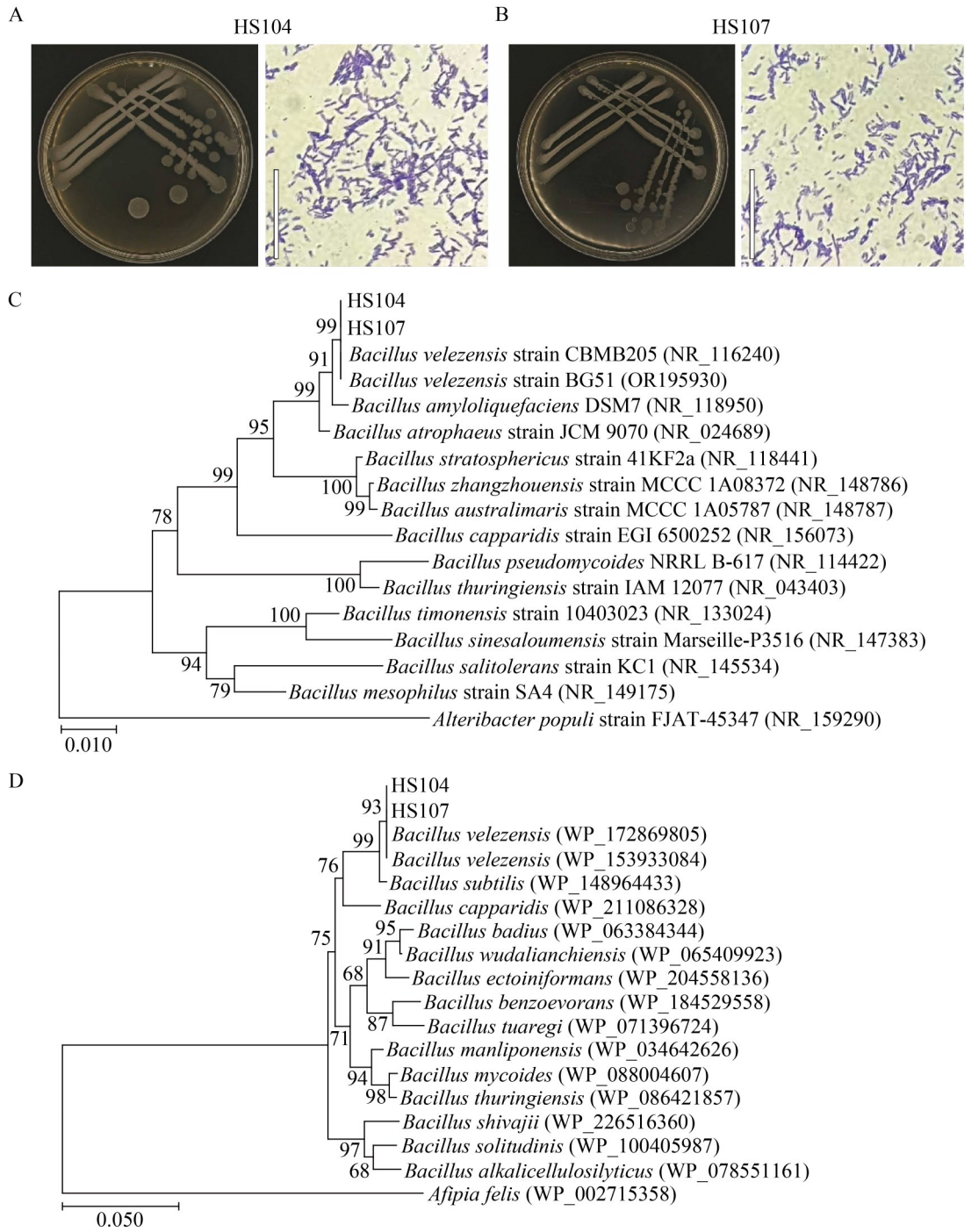


图2 菌株HS104和HS107的鉴定

Figure 2 Identification of strains HS104 and HS107. A: Colony and microscopic morphology of biocontrol strain HS104 (bar=2 μm); B: Colony and microscopic morphology of biocontrol strain HS107 (bar=2 μm); C: Phylogenetic tree constructed based on 16S rRNA; D: Phylogenetic tree constructed based on *rpoB* gene sequences. Numbers in parentheses are GenBank accession numbers; The bootstrap values are shown at the node; The scale bar indicates 0.010 and 0.050 substitutions per nucleotide position.

表1　菌株HS104和HS107的生理生化特性

Table 1　Physiological and biochemical characteristics of strains HS104 and HS107

Determination index	Characteristics of strain HS104	Characteristics of strain HS107
Methyl red determination	+	+
VP assay	−	−
Indole test	−	+
Utilization of citrate	+	+
Nitrate reduction	+	+
Starch hydrolysis	+	−
Hydrogen sulfide production	−	−
Glucose catabolism	+	+
Lactose catabolism	+	−

+ indicates that the reaction result is positive; − indicates that the reaction result is negative.

升持效期)和 2.5% 鲜红 101 色浆(便于识别包衣效果)，按药种比 1:50 的比例完成玉米籽粒包衣(图 5B)。种衣剂质量检测显示，HS104 种衣剂的有效活菌落数为 8.41×10^8 CFU/mL，pH 6.3；HS107 种衣剂有效活菌数 9.13×10^8 CFU/mL，pH 6.4，均符合微生物种衣剂质量标准。

2.6　生防菌株 HS104 和 HS107 的田间防效

在田间试验中，生防菌株 HS104 和 HS107 种衣剂展现了显著的病害防控效果与促生能力。经包衣处理的玉米植株在接种禾谷镰孢孢子悬液 28 d 后，病斑面积显著减小，防效分别达 63.93% (HS104)和 77.33% (HS107)，验证了其高效的病害抑制能力(图 6A、6B)。处理组的生长指标也显著提升，与对照组相比，HS104 处理组株高提高 5.94%，茎粗增加 20.34%；HS107 处理组株高提升 4.49%，茎粗增加 18.64% (图 6C、6D)。

产量评估显示，经种衣剂处理的植株较未处理对照产量显著提高。HS104 处理组增产 8.20%，HS107 处理组增产 9.20% (图 6E、6F)。

3　讨论

本研究通过室内盆栽与田间试验系统证实了贝莱斯芽孢杆菌 HS104 和 HS107 具有显著的“促生-防病”双效功能。在促生方面，发酵液处理使玉米株高、茎粗及生物量分别提升了 14.35%−16.06%、73.43%−79.72% 及 36.95%−70.28%；种衣剂处理也使玉米株高和茎粗显著增加(4.49%−5.94% 和 18.64%−20.34%)。这种促生作用可能源于多重途径：一方面，菌株分泌吲哚乙酸、细胞分裂素等植物激素，直接刺激细胞分裂与伸长[19]；另一方面，通过固氮、解磷等生物转化功能，将土壤中难以利用的矿质元素转化为有效态，持续供给作物养分[20-22]。后续研究将重点解析其代谢组学特征，明确关键促生因子的分子调控网络。

HS104 和 HS107 对玉米茎腐病表现出优异的防控效果(盆栽防效 75.00%、71.00%，田间防效 63.93%、77.33%)。其生防机制主要包括“直接拮抗”与“间接诱导”双重策略[23]。其中，直接拮抗作用是主要的防控途径。生防菌通过分泌次生代谢产物(如环脂肽、表面活性素等抗生素类物质)直接抑制病原菌[24]。例如，刘雪娇等[25]发现贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) 3A3-15 产生的抑菌物质 C14−C15 surfactin A 可使尖孢镰孢的菌丝畸形、断裂，分生孢子萌发抑制率达到 93.20%；贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) B-3 分泌的伊枯草菌素 A 和表面活性素能破坏禾谷镰孢的细胞膜完整性，抑制其生长与代谢[26]。其次，生防菌通过快速繁殖占据根际生态位，与病原菌竞争营养与空间，实现竞争性排斥。同时，生防菌还能重塑根际微生态，促进有益菌增殖并抑制病原菌。Bacon 等[27]证实枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)可通过根际定殖降低串珠镰孢(*Fusarium moniliforme*)的侵染；贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) ZN-S10 则通过增加根际微生物的 α 多样性降低烟草疫霉的丰度[28]。诱导植物系统

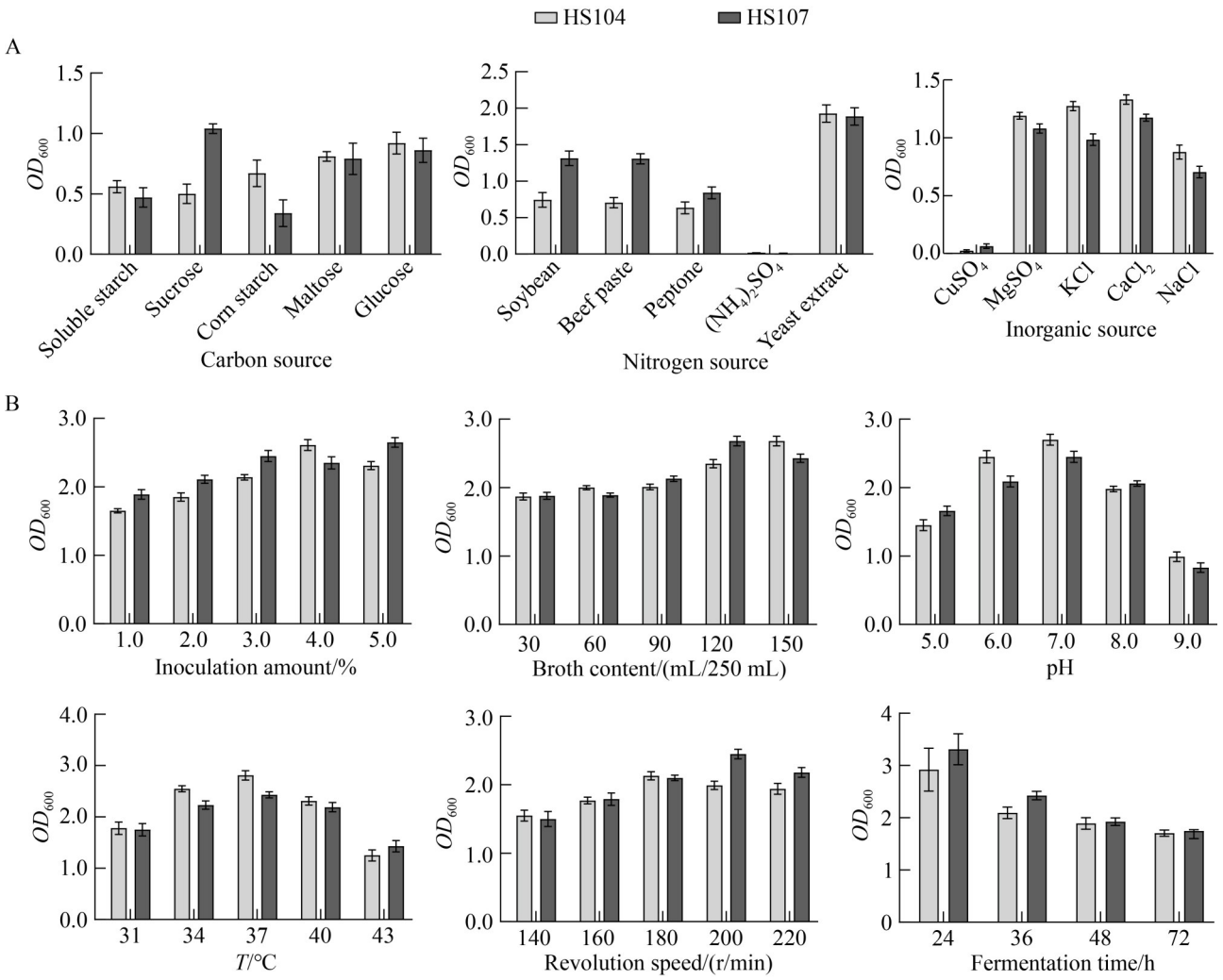


图3 菌株HS104和HS107的发酵条件优化

Figure 3 Optimization of fermentation conditions for strains HS104 and HS107. A: Screening of fermentation medium components; B: Screening of fermentation culture conditions.

抗性是间接防控途径，生防菌作为激发子，可激活植物防御信号通路(如茉莉酸 JA 和水杨酸 SA 途径)，促进植保素、病程相关蛋白(PR 蛋白)合成，并上调抗性基因表达，从而增强宿主免疫[29-30]。

从土壤微生态视角看，长期单一种植模式导致本土微生物群落丰富度下降及作物抗病能力减弱[31]。本研究筛选的 HS104 和 HS107 不仅能直接防病，更有望作为“微生物修复剂”，恢复失衡的根际微生态，构建健康的抗病微环境。这种基于“菌-植-土”协同的绿色防控体系符合农业可持续发展的需求。尽管 2 株菌表现出良好的应用潜力，但其具体的抑菌分子机理尚需深入解析。未来研究将聚焦于分离鉴定关键次生代谢产物，阐明其抑菌分子机制；同时，开展菌群复配研究，利用合成生物学理念构建多功能复合菌群，以增加大田环境下的定殖能力与防效稳定性，为玉米茎腐病的生物防治提供更有效的制剂产品。

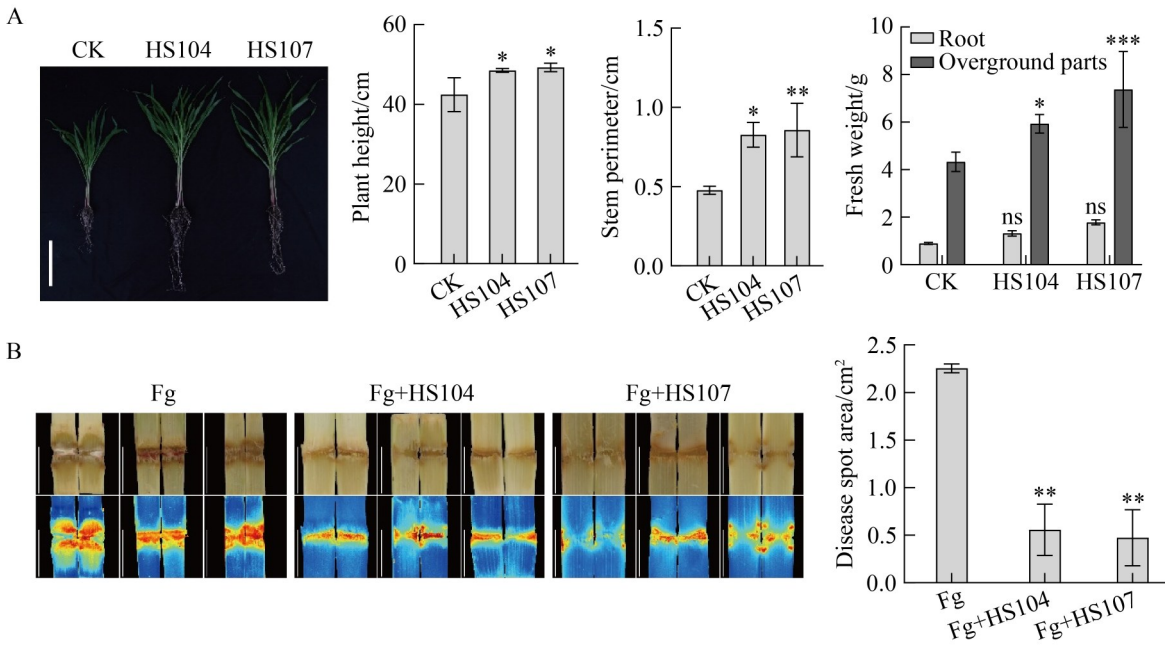


图4　室内试验中菌株HS104和HS107对玉米的影响

Figure 4　Effects of strains HS104 and HS107 on maize in indoor trials. A: Pot experiment phenotypes of HS104 and HS107 in the laboratory (bar=30 cm) and statistical charts of plant height, stem diameter and fresh weight; B: Stem lesion phenotypes (bar=5 cm) and statistical chart of lesion area. * means significant difference at $P<0.05$, ** means significant difference at $P<0.01$, *** means significant difference at $P<0.001$, and ns means no significant difference.

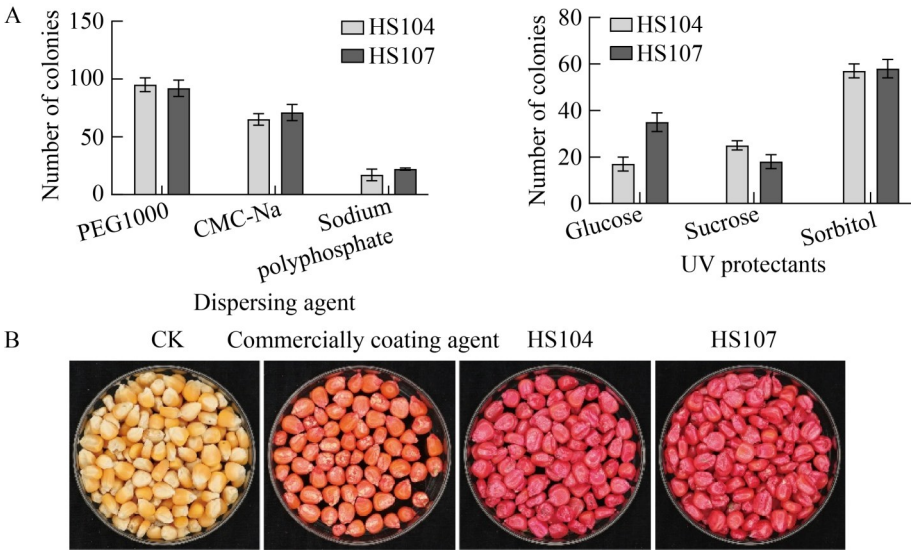


图5　菌株HS104和HS107种衣剂的筛选与制备

Figure 5　Screening and preparation of seed coating agents from strains HS104 and HS107. A: Screening of components for seed coating adjuvant; B: Comparison of the finished seed coating agents of HS104 and HS107 with commercially available seed coating agents.

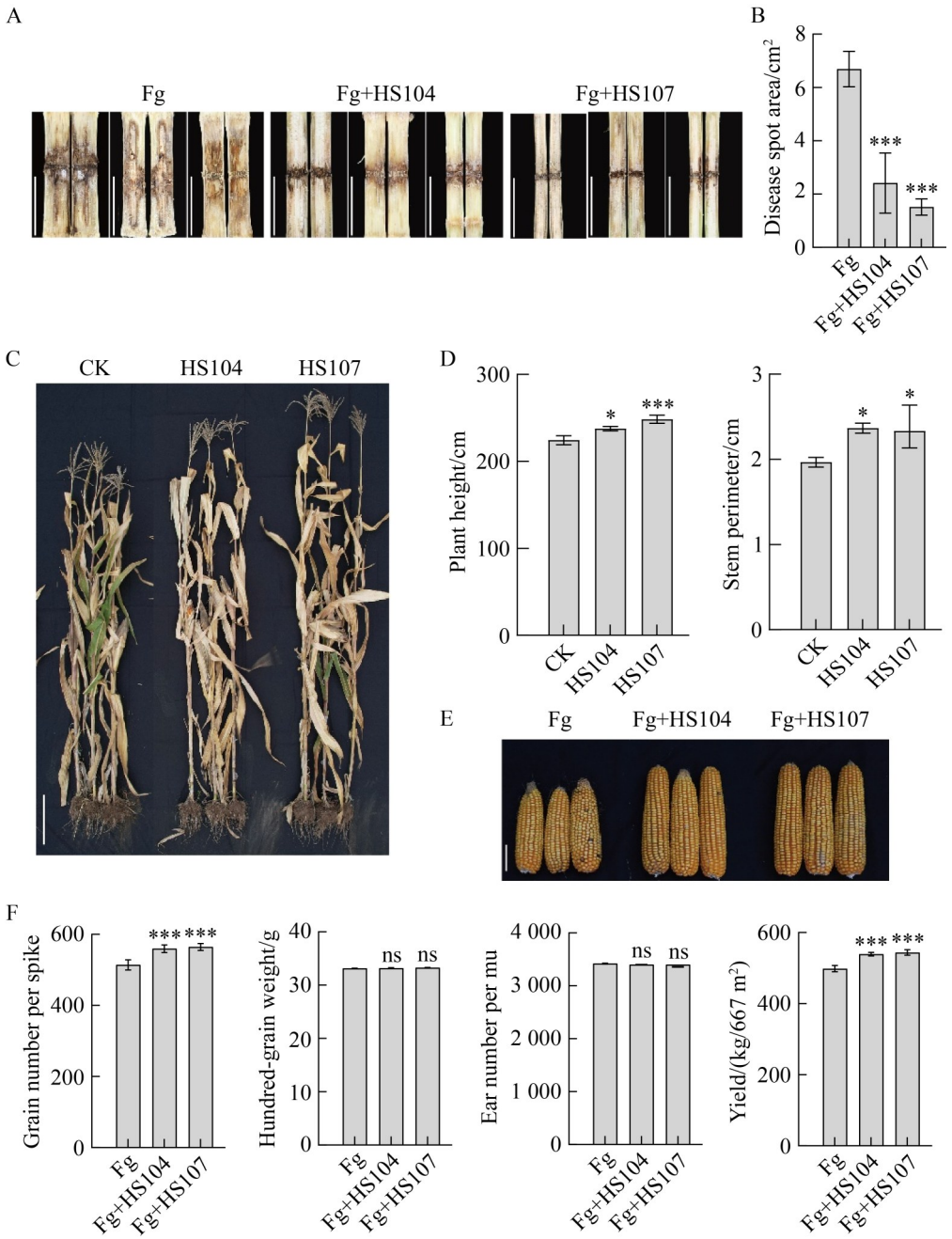


图6 大田试验中菌株HS104和HS107包衣对玉米的影响

Figure 6 Effects of strains HS104 and HS107 on maize in field trials. A: Disease spot phenotypes of field-grown maize (bar=5 cm); B: Statistical chart of disease spot area; C: Plant phenotypes of HS104 and HS107 in field-grown maize (bar=30 cm); D: Statistical chart of plant height and stem diameter of field-grown maize; E: Ear phenotypes of HS104 and HS107 in field-grown maize (bar=5 cm); F: Statistical chart of kernel number per ear, 100-kernel weight, ear number per mu and yield of field-grown maize. * means significant difference at $P<0.05$ level, ** means significant difference at $P<0.01$ level, *** means significant difference at $P<0.001$ level and ns means no significant difference.

4 结论

本研究筛选并鉴定出 2 株贝莱斯芽孢杆菌 HS104 和 HS107，其对禾谷镰孢的抑菌率分别为 69.85% 和 70.05%。经培养基配方与发酵参数的系统优化，确定了 2 菌株的最适发酵工艺：HS104 在葡萄糖 1.0%、酵母浸粉 1.0%、氯化钙 0.1%、180 r/min 条件下生长最佳；HS107 在蔗糖 5.0%、酵母浸粉 0.5%、氯化钙 0.1%、200 r/min 条件下性能最优，二者均以 pH 7.0、37 ℃为最佳发酵条件，发酵周期均为 24 h。室内与田间试验表明，2 株菌发酵液及种衣剂能显著促进玉米生长并高效防控茎腐病(田间防效最高达 77.33%)，增产幅度达 8.20%−9.20%。本研究构建了完整的生防菌研发与应用技术体系，为玉米茎腐病的生物防治提供了高效菌株资源与新型种衣剂产品，具有广阔的农业应用前景。

作者贡献声明

王紫宸：试验操作、收集数据、数据分析及文章撰写；王黎明：数据分析及文章撰写；李时宇：部分试验操作及数据分析；张康、曹宏哲：管理、协调研究活动的策划和执行；邢继红、董金皋：项目负责人，提供经费支持，对研究活动进行指导。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

[1] 姜长云, 李俊茹, 巩慧臻. 中国粮食安全形势演变及“十五五”粮食需求研判[J]. 改革, 2025(8): 35-51.
Jiang CY, Li JR, Gong HZ. The evolution of China’s food security situation and judgement of the food demand during the 15th Five-Year Plan period[J]. Reform, 2025(8): 35-51 (in Chinese).

[2] 国家统计局. 国家统计局关于2025年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2025-12-12). https://www.stats.gov.cn/sj/zxfbhjd/202512/t20251212_1962049.html.
National Bureau of Statistics of China. Announcement on China’s grain output data in 2025[EB/OL]. (2025-12-12). https://www.stats.gov.cn/sj/zxfbhjd/202512/t20251212_1962049.html (in Chinese).

[3] 陈威, 王玉玺, 许海良, 李豪远, 彭星星, 吴占清. 玉米茎腐病近年来的研究进展[J]. 中国植保导刊, 2025, 45(8): 27-30, 50.
Chen W, Wang YX, Xu HL, Li HY, Peng XX, Wu ZQ. Research progress of maize stalk rot[J]. China Plant Protection, 2025, 45(8): 27-30, 50 (in Chinese).

[4] Asiedu DD, Miedaner T. Genetic and genomic tools in breeding for resistance to *Fusarium* stalk rot in maize (*Zea mays* L.)[J]. Plants, 2025, 14(5): 819.

[5] 贾师奇, 刘烨欣, 王紫宸, 藏金萍, 张康, 董金皋, 司贺龙, 邢继红. 玉米茎腐病生防菌株的筛选鉴定及其田间防效[J]. 微生物学通报, 2025, 52(7): 3111-3123.
Jia SQ, Liu YX, Wang ZC, Zang JP, Zhang K, Dong JG, Si HL, Xing JH. Screening and identification of a biocontrol strain against maize stalk rot and evaluation of its field control effect[J]. Microbiology China, 2025, 52(7): 3111-3123 (in Chinese).

[6] 张宇航, 李帅, 武文琦, 孙素丽, 朱振东, 段灿星. 玉米抗镰孢和腐霉茎腐病研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(5): 831-843.
Zhang YH, Li S, Wu WQ, Sun SL, Zhu ZD, Duan CX. Research progress on maize resistance to stalk rot caused by *Fusarium* spp. and *Pythium* spp.[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(5): 831-843 (in Chinese).

[7] Chang TH, Lin YH, Chen KS, Huang JW, Hsiao SC, Chang PL. Cell wall reinforcement in watermelon shoot base related to its resistance to *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. The Journal of Agricultural Science, 2015, 153(2): 296-305.

[8] 王涛. 唐菖蒲伯克霍尔德菌B22在玉米茎腐病生物防治中的潜力研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025.
Wang T. Biocontrol potential of *Burkholderia gladioli* B22 against stalk rot in maize[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2025 (in Chinese).

[9] 马佳, 李颖, 胡栋, 彭杰丽, 贾楠, 张翠绵, 王旭, 王占武. 芽胞杆菌生物防治作用机理与应用研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(4): 639-648.
Ma J, Li Y, Hu D, Peng JL, Jia N, Zhang CM, Wang X, Wang ZW. Progress on mechanism and applications of *Bacillus* as a biocontrol microbe[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2018, 34(4): 639-648 (in Chinese).

[10] 杨冰娟, 陶睿泽, 林丽, 农彩红, 段小丽, 李航媛, 李育川, 徐胜光, 李晶, 黄敏. 芽孢杆菌抑制玉米茎腐病菌禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(12): 42-49.
Yang BJ, Tao RZ, Lin L, Nong CH, Duan XL, Li HY, Li YC, Xu SG, Li J, Huang M. Research progress on inhibition effects of *Bacillus* spp. against maize stalk rot pathogen (*Fusarium graminearum* and *F. verticillioides*)[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(12): 42-49 (in Chinese).

[11] 叶玢妤, 俞跃, 何沛益, 谢启晓, 杨瑞滢, 吴嘉睿, 刘怡琳, 林子然, 赖威宇, 许凌祎, 刘鹏, 洪华嫦. 丛枝菌根真菌-枯草芽孢杆菌组合体系对盐碱土壤微生态的修复作用[J]. 中国环境科学, 2025, 45(1): 440-449.
Ye FY, Yu Y, He PY, Xie QX, Yang RY, Wu JR, Liu YL, Lin ZR, Lai WY, Xu LY, Liu P, Hong HC. Remediation of saline-alkali soil microecology by a combined system of mycorrhizal fungus-*Bacillus subtilis*[J]. China Environmental Science, 2025, 45(1): 440-449 (in

Chinese).
[12] 权春善, 王军华, 徐洪涛, 范圣第. 一株抗真菌解淀粉芽孢杆菌的分离鉴定及其发酵条件的初步研究[J]. 微生物学报, 2006, 46(1): 7-12.
Quan CS, Wang JH, Xu HT, Fan SD. Identification and characterization of a *Bacillus amyloliquefaciens* with high antifungal activity[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2006, 46(1): 7-12 (in Chinese).
[13] Cao Y, Pi HL, Chandrangsu P, Li YT, Wang YQ, Zhou H, Xiong HQ, Helmann JD, Cai YF. Antagonism of two plant-growth promoting *Bacillus velezensis* isolates against *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium oxysporum*[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4360.
[14] Xia XY, Wei QH, Wu HX, Chen XY, Xiao CX, Ye YP, Liu CT, Yu HY, Guo YW, Sun WX, Liu WD. *Bacillus* species are core microbiota of resistant maize cultivars that induce host metabolic defense against corn stalk rot[J]. Microbiome, 2024, 12: 156.
[15] Wang LM, Jia SQ, Du Y, Cao HZ, Zhang K, Xing JH, Dong JG. Biocontrol potential of *Bacillus subtilis* A3 against corn stalk rot and its impact on root-associated microbial communities[J]. Agronomy, 2025, 15(3): 706.
[16] 高晓梅, 李杨, 于淼, 敖静, 刘晓辉, 孙玉禄, 姚彦坡, 池景良. 多功能根际生防促生放线菌的分离鉴定及其对辣椒的益生效果[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 906-916.
Gao XM, Li Y, Yu M, Ao J, Liu XH, Sun YL, Yao YP, Chi JL. Screening, identification, and characterizations of antagonistic actinomycetes strains with plant growth promoting properties and beneficial effects on pepper[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(4): 906-916 (in Chinese).
[17] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
[18] 李志普. 玉米镰孢茎腐病生防菌株的筛选鉴定与菌剂研发[D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
Li ZP. Screening and identification of biological strains and microbial agent research for corn stalk rot caused by *Fusarium* spp.[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023 (in Chinese).
[19] 施春兰, 曾舒泉, 王志江, 谢永辉, 詹莜国, 黄永迪, 吴国星, 高熹, 秦得强. 2株烟草病害拮抗细菌的分离鉴定和发酵条件优化研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35(7): 81-90.
Shi CL, Zeng SQ, Wang ZJ, Xie YH, Zhan YG, Huang YD, Wu GX, Gao X, Qin DQ. Isolation and identification of two antagonistic bacterial strains against tobacco diseases and optimization of fermentation conditions[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35(7): 81-90 (in Chinese).
[20] 吴沁. 解淀粉芽孢杆菌OR2-30对禾谷镰孢菌的抑菌机理研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
Wu Q. Study on the bacteriostatic mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* OR2-30 against *Fusarium graminearum*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022 (in Chinese).
[21] Park JH, Bolan N, Megharaj M, Naidu R. Concomitant rock phosphate dissolution and lead immobilization by phosphate solubilizing bacteria (*Enterobacter* sp.)[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(4): 1115-1120.
[22] De Oliveira Mendes G, Murta HM, Valadares RV, da Silveira WB, da Silva IR, Costa MD. Oxalic acid is more efficient than sulfuric acid for rock phosphate solubilization[J]. Minerals Engineering, 2020, 155: 106458.
[23] 郭江岸. 贝莱斯芽孢杆菌(GF-46)促进玉米生长及抗茎腐病机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2025.
Guo JA. Mechanisms of *bacillus velezensis* GF-46 in promoting maize growth and suppressing stalk rot[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2025 (in Chinese).
[24] Kuebutornye FKA, Abarike ED, Lu YS. A review on the application of *Bacillus* as probiotics in aquaculture[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 87: 820-828.
[25] 刘雪娇, 李红亚, 李术娜, 朱宝成, 高同国. 贝莱斯芽孢杆菌3A3-15生防和促生机制[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 302-310.
Liu XJ, Li HY, Li SN, Zhu BC, Gao TG. Biocontrol and growth promotion mechanisms of *Bacillus velezensis* 3A3-15[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 302-310 (in Chinese).
[26] Xie Y, Zhang M, Wu DH, Cai GL, Lu J. The antifungal substance from *Bacillus velezensis* B-3 improved the malt quality against premature yeast flocculation induced by *Fusarium graminearum* infection[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(12): 4867-4878.
[27] Bacon CW, Yates IE, Hinton DM, Meredith F. Biological control of *Fusarium moniliforme* in maize[J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(suppl 2): 325-332.
[28] Chen EL, Chao SF, Shi B, Liu L, Chen ML, Zheng YL, Feng XX, Wu HM. *Bacillus velezensis* ZN-S10 reforms the rhizosphere microbial community and enhances tomato resistance to TPN[J]. Plants, 2023, 12(20): 3636.
[29] 康星星. 贝莱斯芽孢杆菌CC09防治小麦全蚀病菌侵染的机制[D]. 南京: 南京大学, 2019.
Kang XX. Mechanism of *Bacillus velezensis* CC09 in controlling pathogen *Gaeumannomyces graminis* var. tritici[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019 (in Chinese).
[30] Mukhopadhyay R, Kumar D. *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2020, 30: 133.
[31] Zhou YY, Yang Z, Liu JG, Li XD, Wang XX, Dai CC, Zhang TL, Carrión VJ, Wei Z, Cao FL, Delgado-Baquerizo M, Li XG. Crop rotation and native microbiome inoculation restore soil capacity to suppress a root disease[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 8126.