

玉米-大豆轮作模式下根际促生放线菌的筛选及合成菌群的促生效果

乔梦可^{1,2#}, 王黎明^{1,2#}, 李庭锋³, 张康^{1,2}, 曹宏哲^{1,2}, 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

3 黑龙江省农垦科学院农作物开发研究所, 黑龙江 佳木斯

乔梦可, 王黎明, 李庭锋, 张康, 曹宏哲, 邢继红, 董金皋. 玉米-大豆轮作模式下根际促生放线菌的筛选及合成菌群的促生效果[J]. 微生物学报, 2026, 66(5): 2208-2225.

QIAO Mengke, WANG Liming, LI Tingfeng, ZHANG Kang, CAO Hongzhe, XING Jihong, DONG Jingao. Screening of plant growth-promoting *Actinomycetes* strains and evaluation of plant growth-promoting effect of the synthetic microbial consortium in a maize-soybean rotation system[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(5): 2208-2225.

摘要: 【目的】挖掘玉米-大豆轮作模式下玉米根际土壤中的植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)资源, 明确其在玉米与大豆生长过程中的功能, 为农业可持续发展提供微生物层面的理论依据与实践支撑。【方法】采用稀释涂布法, 以高氏一号培养基为分离介质, 分离玉米根际土壤中的放线菌, 并筛选出具备蛋白酶分泌、产铁载体以及固氮能力的促生菌株。运用形态学观察结合 16S rRNA 基因序列分析技术, 对筛选所得菌株进行鉴定。经发酵条件优化和耐胁迫能力测试后, 获得复合菌株发酵液合成菌群(synthetic microbial consortium, SMC)。通过促生试验, 验证其对玉米和大豆生长的促生作用。【结果】从玉米根际土壤中分离获得 105 株放线菌, 其中 5 株菌株同时具备产蛋白酶、产铁载体和固氮能力。经鉴定, 确定 JM-18、JM-21 为波卡利水稻节杆菌(*Arthrobacter pokkali*), JM-24 为水稻节杆菌(*Arthrobacter oryzae*), JM-47 为 *Arthrobacter ginsengisoli*, JM-48 为滋养节杆菌(*Arthrobacter pascens*)。同时发现, 这 5 株菌均具备一定的解无机磷和产 NH₃ 能力。之后, 按 1:1 的比例将其复配, 构成合成菌群 SMC。促生试验结果显示, SMC 处理对玉米种子发芽和盆栽玉米的生长发育均具有显著促生作用, 玉米种子根长和芽长分别增加 120.22%、20.94%, 盆栽玉米的株高、根长、鲜重、干重均显著提升。此外,

资助项目: 国家重点研发计划(2023YFD1400105); 河北省高等学校科学研究项目(CXZX2026057); 保定市科技计划(2494N032); 国家现代农业产业技术体系(CARS-02)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1400105), the Research Project of Science and Technology in Universities of Hebei Province (CXZX2026057), the Baoding Science and Technology Planning (2494N032), and the National Modern Agricultural Industry Technology System (CARS-02).

[#]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding authors. E-mail: XING Jihong, xingjihong2000@126.com; DONG Jingao, dongjingao@126.com

Received: 2025-12-11; Accepted: 2026-02-03; Published online: 2026-02-13

SMC 对大豆的生长发育同样表现出显著促进效果, 可使大豆种子芽长增长 42.08%, 盆栽大豆的株高、根长、鲜重、干重分别增长 39.40%、93.31%、161.14%、163.57%。【结论】本研究筛选出 5 株兼具产蛋白酶、产铁载体和固氮能力的放线菌, 其构建的合成菌群 SMC 能够显著促进玉米和大豆的生长, 为开发高效、环保的微生物肥料提供了极具潜力的优质菌株资源。

关键词: 玉米-大豆轮作; 植物根际促生菌; 节杆菌属; 合成菌群

Screening of plant growth-promoting *Actinomycetes* strains and evaluation of plant growth-promoting effect of the synthetic microbial consortium in a maize-soybean rotation system

QIAO Mengke^{1,2#}, WANG Liming^{1,2#}, LI Tingfeng³, ZHANG Kang^{1,2}, CAO Hongzhe^{1,2}, 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 Hebei Province for Plant Physiology and Molecular Pathology, Baoding, Hebei, China

3 Institute of Crop Development, Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Jiamusi, Heilongjiang, China

Abstract: [Objective] To explore plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) resources from the rhizosphere soil of maize in a maize-soybean rotation system and elucidate their roles in promoting the growth of maize and soybean, thus providing a theoretical basis and practical support at the microbial level for the sustainable development of agriculture. **[Methods]** *Actinomycetes* strains were isolated from the rhizosphere soil of maize *via* the dilution plating method with Gauze's Synthetic Medium No. 1. The strains capable of secreting protease, producing siderophores, and fixing nitrogen were selected out. The isolated strains were identified by means of morphological observation and 16S rRNA gene sequence analysis. After optimization of the fermentation conditions and tests of stress tolerance, a synthetic microbial consortium (SMC) was prepared. Its growth-promoting effects on maize and soybean were evaluated through seed germination tests and pot experiments. **[Results]** A total of 105 *Actinomycetes* strains were isolated, five of which simultaneously exhibited the abilities of siderophore production, protease secretion, and nitrogen fixation. These strains were identified as *Arthrobacter pokkalii* (JM-18, JM-21), *A. oryzae* (JM-24), *A. ginsengisoli* (JM-47), and *A. pascens* (JM-48). They were mixed in equal proportions to form a SMC. Growth promotion assays showed that the SMC significantly improved maize seed germination and maize plant growth in pots. Specifically, the SMC increased the root length and shoot length in the seed germination assay by 120.22% and 20.94%, respectively, and it also significantly increased the plant height, root length, fresh weight, and dry weight of maize plants in pots. Moreover, the SMC markedly promoted soybean development, increasing soybean shoot length by 42.08% during seed germination. For potted soybean plants, the SMC increased the plant

height, root length, fresh weight, and dry weight by 39.40%, 93.31%, 161.14%, and 163.57%, respectively. **[Conclusion]** We successfully identified five *Actinomycetes* strains capable of secreting protease, producing siderophores, and fixing nitrogen. The SMC constructed from these strains significantly enhances the growth of both maize and soybean. This study offers promising microbial resources for the development of efficient and environmentally friendly biofertilizers.

Keywords: maize-soybean rotation; plant growth-promoting rhizobacteria; *Arthrobacter*; synthetic microbial consortium

推动绿色农业可持续发展的关键在于挖掘能够替代或减量施用化肥的生态友好型技术。轮作作为一种契合可持续发展理念的耕作模式，在农业生产中展现出诸多显著优势。它能够有效改善因土壤连作引发的障碍问题，提升耕地质量，进而提高作物产量^[1]。相较于玉米单作模式，轮作模式通过改变根际微生物的群落组成，招募假单胞菌、链霉菌等有益菌群，优化土壤营养成分，为作物生长创造更为有利的条件^[2]。基于此，从轮作土壤中挖掘具有潜力的微生物肥料，尤其是植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)，因其能够促进植物生长、增强抗逆性，对于减少对化学肥料的依赖以及推进农业可持续发展具有重要意义^[3]。

PGPR 能够通过多种途径直接或间接促进植物生长。在直接促进方面，它们可通过营养活化与供给机制发挥作用，例如产生蛋白酶分解土壤中的有机质(如有机氮、含磷有机物)，将其转化为植物可直接吸收利用的无机养分(如铵、磷酸盐)；具备固氮能力，为植物和土壤提供充足的氮源；还能产生铁载体，以高效螯合铁的方式，释放磷或其他元素，满足植物生长对各种元素的需求^[4]。在间接调节方面，PGPR 可通过产生抗生素、溶菌酶以及诱导系统抗性等方式，增强植物的抗逆性，助力化肥减施增效，推动农业绿色可持续发展^[5]。PGPR 种类繁多、分布广泛，涵盖了细菌、真菌、原生动物及藻类等多种微生物类群。其中，假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、链霉菌

属(*Streptomyces*)、木霉菌属(*Trichoderma*)等为优势菌群^[6]。大量研究已证实不同 PGPR 对植物生长具有显著促进作用。例如，贾艺伟^[7]从平邑甜茶根际土中分离获得一株枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*) T3-5，该菌株对平邑甜茶幼苗的生物量积累具有显著促进作用。杨晓帆等^[8]筛选到一株荧光假单胞菌(*P. fluorescens*)，该菌株通过增强桃树的光合作用，并协同提升其根系与叶片中的氮、磷、钾及铁等关键营养元素的含量，实现了对桃树植株生长的全面促进。Contreras-Cornejo 等^[9]研究发现绿色木霉(*T. viride*)可以产生吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)，促进拟南芥侧根的发育，使其鲜重增加 62%。

当前，PGPR 的应用研究主要集中在细菌与真菌领域，关于放线菌的研究应用相对较少。鉴于放线菌在促进植物生长方面可能具有独特作用^[10]，Liu 等^[11]从森林根际土壤中分离出一株链霉菌 YNK-FS0020 (*S. olivoreticuli*，现分类修订为 *S. abikoensis*)，研究发现其能抑制多种植物病原菌，具备溶解无机和有机磷及产铁载体的能力，能够显著促进番茄生长，同时代谢组学检测揭示了该菌株能够调控激素以及分泌抗菌物质等机制，这表明开发利用 PGPR 放线菌以促进粮油作物的生长发育具有广阔的发展潜力。

本研究立足于玉米-大豆轮作模式，旨在从玉米根际土壤中分离筛选获得具有产蛋白酶、产铁载体、固氮等促生作用的放线菌，并对其发酵条件进行优化。进一步将筛选得到的优良放线菌按照等体积比进行复配，通过种子促生试验和盆栽试验验证其对玉米和大豆生长发育

的促进作用。本研究旨在深入探究 PGPR 放线菌在促进粮油作物生长方面的开发与应用, 为微生物菌剂的开发提供菌种资源及技术支持, 进而推动农业绿色可持续发展。

1 材料与方 法

1.1 材 料

土壤采自黑龙江省佳木斯市玉米-大豆轮作种植区(46°46'48"N, 130°25'12"E), 于轮作第 5 年玉米成熟时随机选取长势良好的健康玉米植株 5 株, 采用“抖根法”用无菌袋收集根际土壤, 置于 4 °C 冰箱中保存。本研究所用玉米品种为‘先玉 335’、大豆品种为‘W82’。

1.2 促生菌株的筛选与鉴定

采用梯度稀释法, 结合高氏一号培养基^[12], 对土壤样品中的放线菌进行分离培养。挑取形态各异的菌株, 经多次划线纯化操作后, 将菌株接种于 50 mL 液体高氏一号培养基中, 28 °C、220 r/min 培养 3–5 d, 至 $OD_{600}=1.0$ 时备用。取 3 μ L 上述菌液, 分别滴加到铬天青 S (chrome azurol S, CAS) 培养基^[13]、阿须贝无氮培养基^[14]和蛋白酶检测培养基^[15]上, 培养 5–7 d, 检测菌株是否具备产铁载体、固氮和产蛋白酶的能力。

将筛选出的促生菌进行菌落形态特征观察, 包括菌落的形状、大小、颜色、表面透明度以及边缘情况等。参照《常见细菌系统鉴定手册》^[16]的方法进行革兰氏染色、Voges-Proskauer (V-P)、柠檬酸盐、丙酸盐、D-木糖、L-阿拉伯糖、D-甘露醇、明胶液化、pH 5.7 生长、硝酸盐还原、淀粉水解试验, 依据《伯杰细菌鉴定手册》^[17]对菌株进行初步鉴定。使用细菌基因组 DNA 快速提取试剂盒(北京博迈德生物技术有限公司)提取 5 株促生菌株的 DNA, 利用通用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGC TCAG-3') 和 1492R (5'-TACGGCTACCTTGTTA CGAGTT-3') 进行 16S rRNA 基因 PCR 扩增, 反应体系和条件参考李志普^[18]的方法。PCR 产物经

电泳检测后进行测序鉴定, 将测得的 16S rRNA 基因序列结果在 EzBioCloud 数据库(<https://www.ezbiocloud.net>)上进行比对。最后使用 MEGA 7.0 软件, 结合邻接(neighbor-joining, NJ)法构建菌株的系统发育树, 设置 bootstrap 值为 1 000。

1.3 菌株的其他促生特性研究

1.3.1 解磷、解钾能力的测定

将 5 株菌分别接种于蒙金娜无机磷培养基和硅酸盐固体培养基中, 28 °C 恒温培养箱中倒置培养 5–7 d, 观察菌落周围是否有透明圈产生^[18]。

1.3.2 产 IAA 能力的测定

采用 Salkowski 比色法, 将各菌株接种至含有 L-色氨酸的 LB 液体培养基中 28 °C 培养 24 h, 每个菌株取 50 μ L 菌悬液于 96 孔板中, 加入等量 Salkowski 显色液进行显色反应, 以 IAA 标准液作为阳性对照, 于室温、避光条件下放置 30 min 后观察颜色是否变红^[19]。

1.3.3 产 NH₃ 能力的测定

将菌株分别接种至装有 10 mL 蛋白胨水 (10 g/L) 的试管中, 28 °C 培养 2–3 d, 各试管加入 0.5 mL Nessler's 试剂, 观察颜色是否变为褐色或黄色^[20]。

1.4 促生菌株的发酵条件优化

对促生菌的最适碳源、氮源和无机盐进行筛选, 以蔗糖、葡萄糖、可溶性淀粉、甘露糖、半乳糖或木糖作为碳源, 以牛肉膏、蛋白胨、胰蛋白胨、大豆蛋白胨或酵母浸粉作为氮源, 以氯化钠、氯化镁、磷酸钙、氯化钾、硫酸锌或磷酸氢二钾+磷酸二氢钾(1:1)作为无机盐。在 28 °C、220 r/min 培养 48 h 后, 测定 OD_{600} , 以评估不同营养条件下菌株的生长情况, 进而确定各菌株的最适培养基。

在此基础上, 进一步开展促生菌的发酵条件优化, 包括最适 pH (6.0、7.0、8.0、9.0、10.0)、发酵温度(24、28、34、37、42 °C)、发酵转速(120、160、200、240、280 r/min)以及装

液量(30%、40%、50%、60%、70%)等参数。

1.5 促生菌株的抗逆能力检测

将各菌株接种至最适培养基中发酵后,分别置于-20、0、20、40、60 °C的环境中培养8 h,待菌液温度回到室温后再次测定菌液的 OD_{600} 值,以评估菌株对低温和高温环境的耐受能力。之后将各菌株分别接种至NaCl含量为0.0、0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%、5.5%的培养基,以及pH为6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0的培养基中,8 h后测定 OD_{600} 值,以评估菌株的耐盐碱能力。

1.6 菌株相容性试验及合成菌群构建

将各菌株接种至最适培养基中,获得菌株发酵液后开展菌株相容试验。将各菌株菌液的 OD_{600} 值调至1.0左右,取100 μ L菌液均匀涂布于NA培养基表面,并在平板上放置直径为6 mm的无菌滤纸片。于每张滤纸片上滴加2 μ L其他待测菌株发酵液,待晾干后,倒置培养3-5 d,观察是否出现抑菌圈,以评估不同菌株间的相容性,每个处理设置3个重复。若各菌株间均能相容,则将各菌株单独发酵后,按照等体积比复合,构成合成菌群(synthetic microbial consortium, SMC)。

1.7 合成菌群 SMC 的促生功能研究

使用1% NaOCl对玉米和大豆种子进行表面消毒处理,然后用200 mL SMC发酵液(OD_{600} 约为0.6)对种子进行浸种处理8 h,以灭菌水处理作为对照。将种子均匀摆放在铺有浸湿滤纸片的玻璃皿中,在黑暗条件下进行恒温催芽,每个处理设置5个平行,每个平行3个重复。7 d后,观察并记录种子萌发情况。之后,从各处理中取长势一致的发芽种子,移栽至无菌营养土中进行盆栽试验,每个处理9株幼苗,移栽后每隔7 d进行灌菌处理,每次每株幼苗浇灌菌悬液50 mL (OD_{600} 约为0.6),对照组浇灌同等体积无菌水。45 d后,观察并测量盆栽植株的生长情况。

1.8 数据分析

使用Excel 2019软件对试验数据进行整理,运用GraphPad Prism 9.5软件通过单因素方差分析和 t 检验进行显著性差异分析,其中* $P<0.05$ 表明组间差异显著;** $P<0.01$ 表明组间差异极显著;ns表示组间差异不显著,不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。使用MEGA 11软件构建系统发育树。

2 结果与分析

2.1 促生菌株的筛选与鉴定结果

从玉米根际土壤中成功筛选出105株放线菌。其中, JM-18、JM-21、JM-24、JM-47和JM-48这5株菌同时具备产蛋白酶、产铁载体和固氮能力(图1A)。对这5株菌测定了11个生理生化指标(表1),同时观察其菌落形态,发现均呈黄色或白色,形状为圆形,表面凸起、圆润且边缘规则(图1B)。16S rRNA基因鉴定结果显示, JM-18和JM-21与波卡利水稻节杆菌(*Arthrobacter pokkali*)的相似度最高,分别为99.32%和99.18%; JM-24与水稻节杆菌(*A. oryzae*)的相似度最高,达到100%; JM-47与*A. ginsengisoli*的相似度最高,达99.60%(图1B); JM-48与滋养节杆菌(*A. pascens*)的相似度最高,达到100%。结合形态学、生理生化特征与分子鉴定结果,确定JM-18和JM-21为波卡利水稻节杆菌(*A. pokkali*), JM-24为水稻节杆菌(*A. oryzae*), JM-47为*A. ginsengisoli*, JM-48为滋养节杆菌(*A. pascens*)。

2.2 菌株的其他促生特性

对5株菌的其他促生特性进行检测,发现5株菌在蒙金娜无机磷培养基上能够产生透明圈,在产 NH_3 试验中菌液均变为黄色,表明5株菌均具备一定的解无机磷和产 NH_3 能力;然而,5株菌在硅酸盐固体培养基上未能产生透明圈,且在Salkowski显色反应中菌液均未变红,

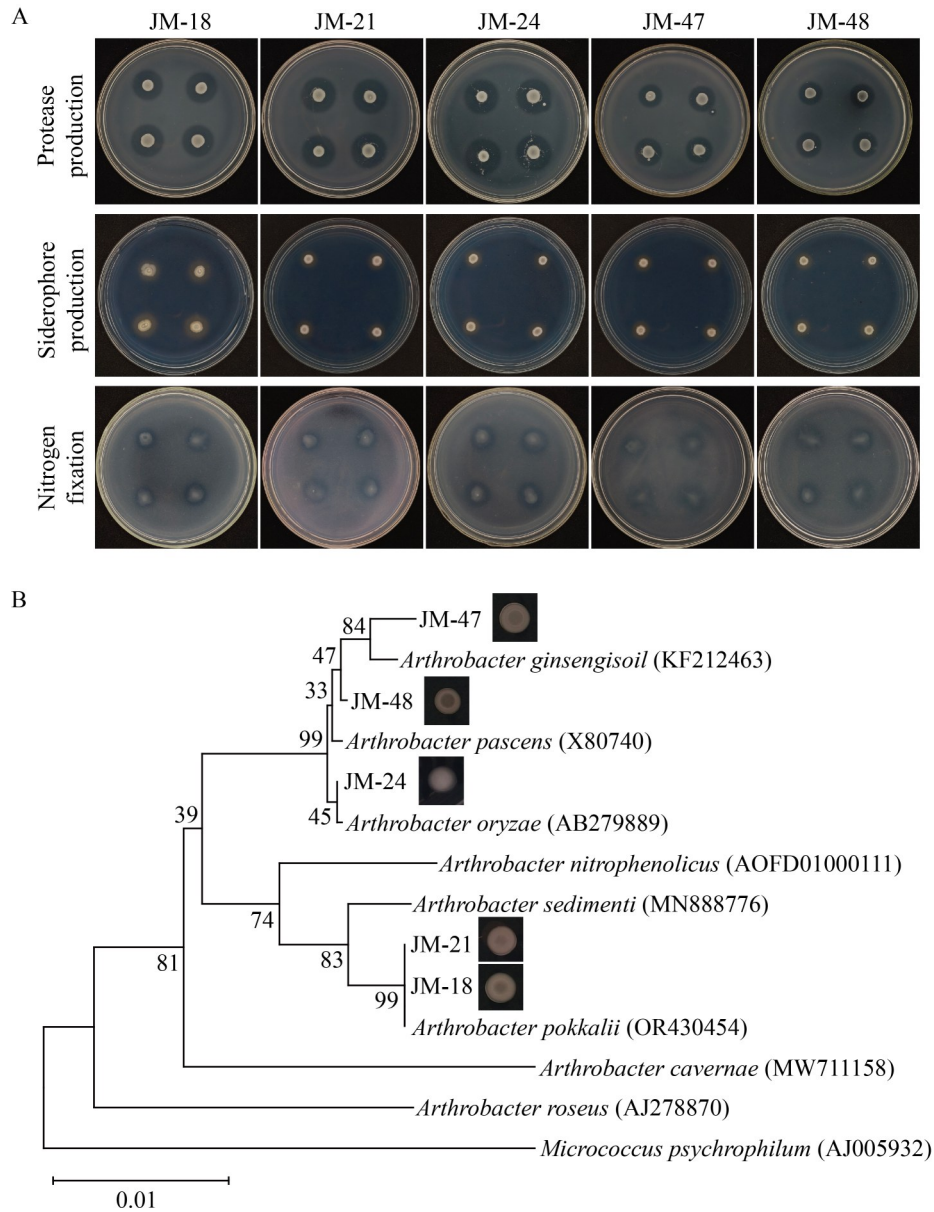


图1 促生菌株的促生特性与鉴定

Figure 1 Promoting characteristics and identification of growth-promoting strains; B: Phylogenetic tree of five strains constructed based on 16S rRNA gene sequence. The numbers in parentheses are GenBank accession numbers, the scale bar indicates a 1% sequence (or nucleotide) difference.

表明其均不具备解钾和产 IAA 能力(图 2)。

2.3 促生菌株的发酵条件优化

对 5 株菌株的发酵培养基进行优化, 发现 JM-18 在营养条件为蔗糖、牛肉膏、 K_2HPO_4 +

KH_2PO_4 (1:1)时 OD_{600} 值达到最高; JM-21 在营养条件为蔗糖、大豆蛋白胨、 $K_2HPO_4+KH_2PO_4$ (1:1)时 OD_{600} 值最高; JM-24 在营养条件为蔗糖、酵母浸粉、KCl 时 OD_{600} 值最高; JM-47 和

表1 五株促生菌的生理生化特征

Table 1 Physiological and biochemical characteristics of five growth-promoting strains

Test item	JM-18	JM-21	JM-24	JM-47	JM-48
Gram staining	+	+	+	+	+
Voges-Proskauer test	+	+	+	+	+
Citrate utilization	+	+	+	+	+
Propionate utilization	W	W	W	W	W
D-xylose	+	+	+	+	+
L-arabinose	-	-	-	+	+
D-mannitol	+	+	+	+	+
Gelatin liquefaction	+	+	+	+	+
Growth at pH 5.7	+	+	+	+	+
Nitrate reduction	+	+	+	+	+
Starch hydrolysis	-	-	+	+	+

+: Positive; -: Negative; W: Weakly positive.

JM-48 在营养条件为蔗糖、酵母浸粉、 K_2HPO_4 + KH_2PO_4 (1:1)时 OD_{600} 值最高(图 3)。

对 5 株菌株的发酵条件进行优化, 结果

显示, JM-18 在发酵条件为 pH 9.0、28 °C、280 r/min、装液量 40% 时 OD_{600} 值最高; JM-21 在 pH 7.0、28 °C、280 r/min、装液量 40% 时 OD_{600} 值最高; JM-24 在 pH 7.0、24 °C、160 r/min、装液量 40% 时 OD_{600} 值最高; JM-47 在 pH 9.0、24 °C、280 r/min、装液量 50% 时 OD_{600} 值最高; JM-48 在 pH 7.0、28 °C、160 r/min、装液量 40% 时 OD_{600} 值最高(图 4)。

2.4 促生菌株的抗逆性研究

对 5 株菌株的抗逆性进行检测, 结果发现: 随着温度升高, 各菌株的浓度逐渐下降, 但在 60 °C 条件下, OD_{600} 值仍能分别达到 0.327、0.376、0.316、0.363、0.324; 随着温度降低, 各菌株的 OD_{600} 值缓慢降低, 在 -20 °C 条件下仍能分别达到 0.466、0.471、0.548、0.418、0.449 (图 5A), 表明这 5 株菌在高温 60 °C 和低温 -20 °C 时仍能生长。同样地, 随着盐浓度上升, 各菌株的浓度逐渐下降, 在盐浓度为 4.5% 时各菌株仍能够正常生长; 盐浓度为 5.5% 时 OD_{600} 值

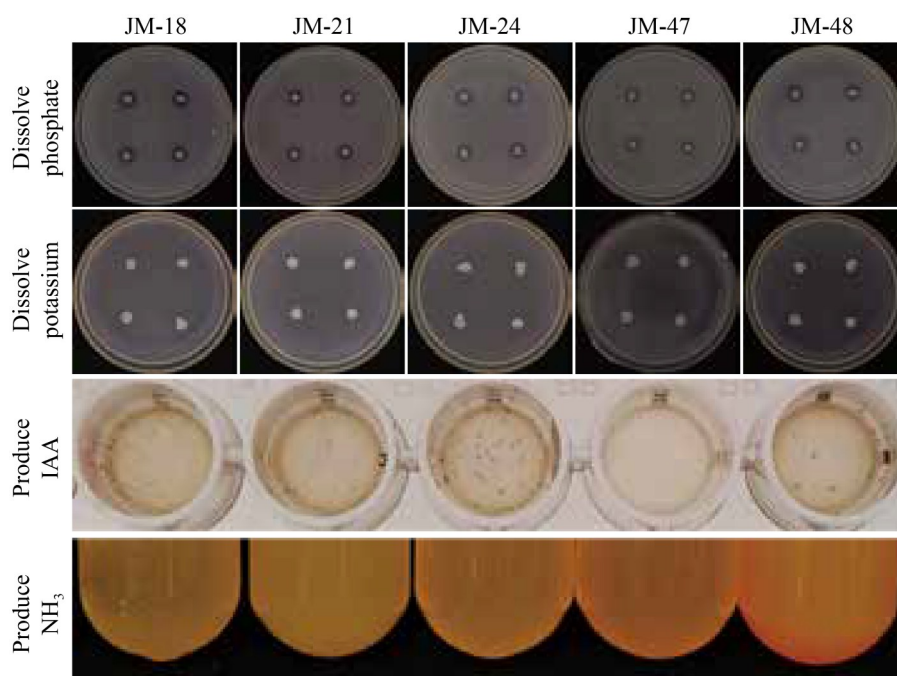
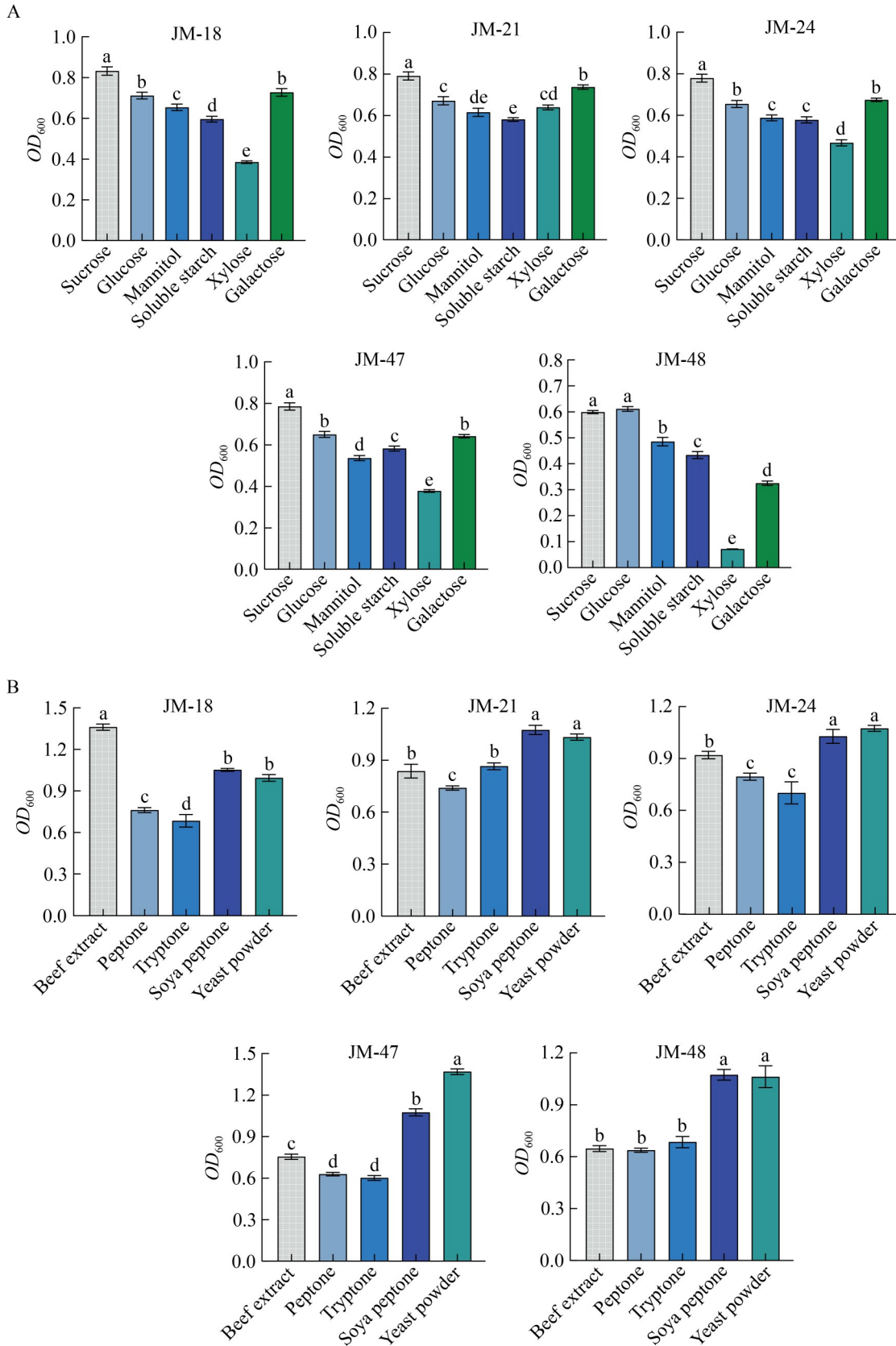


图2 五株菌的其他促生功能研究

Figure 2 Studies on other functions of five strains.



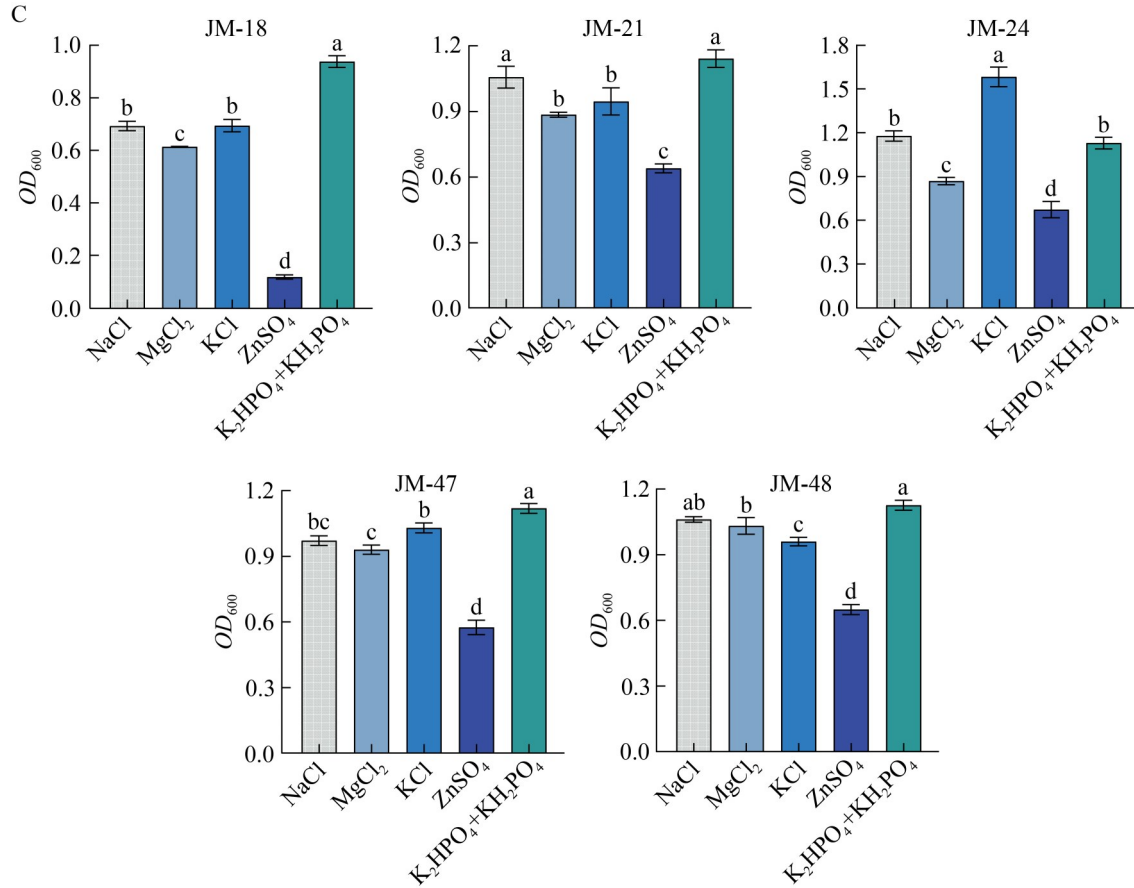


图3 五株菌的最适培养基成分筛选

Figure 3 Screening of the optimal medium composition for the five strains. A: Optimal carbon source; B: Optimal nitrogen source; C: Optimal inorganic salts. Different lowercase letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$).

出现明显下降(图 5B)。此外,各菌株在 pH 9.0 时仍能保持生长, OD_{600} 值能达到 0.243–0.315; 在 pH 10.0 时菌株生长明显受到抑制,基本停止生长(图 5C)。因此,5 株促生菌在 pH 为 9.0、盐浓度为 4.5% 的盐碱胁迫下仍能维持生长。

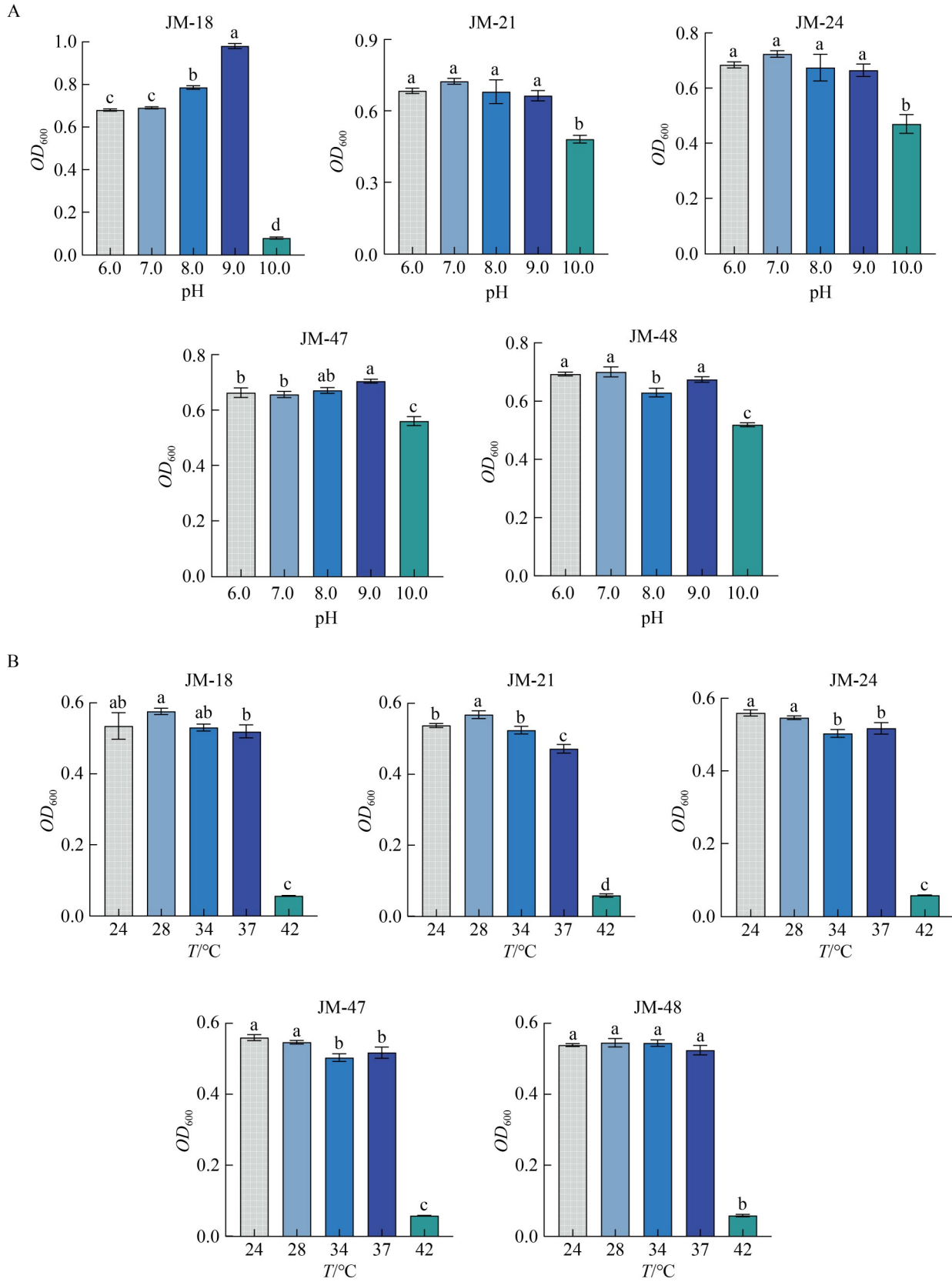
2.5 合成菌群 SMC 对玉米的促生效果

菌株相容性试验结果表明,5 株促生菌之间均具有良好的相容性,能够进行复配(表 2)。将 5 株菌复合构成合成菌群 SMC 后,验证其对玉米的促生效果。结果显示,相较于对照组,SMC 处理对玉米种子的促生效果显著(图 6A)。

经 SMC 发酵液处理后,种子的根长增长 120.22% ($P < 0.01$),芽长增长 20.94% ($P < 0.05$) (图 6B)。对盆栽玉米的促生效果同样表明,相较于对照组,合成菌群 SMC 处理后的盆栽玉米生长势更佳(图 6C),玉米苗的株高、根长、鲜重和干重均高于对照组,分别增长了 24.74%、48.21% ($P < 0.05$)、110.08% 和 64.05% ($P < 0.01$) (图 6D)。

2.6 合成菌群 SMC 对大豆的促生效果

为明确 SMC 对大豆是否同样具有促生作用,试验检测了 SMC 对大豆生长发育的影响。



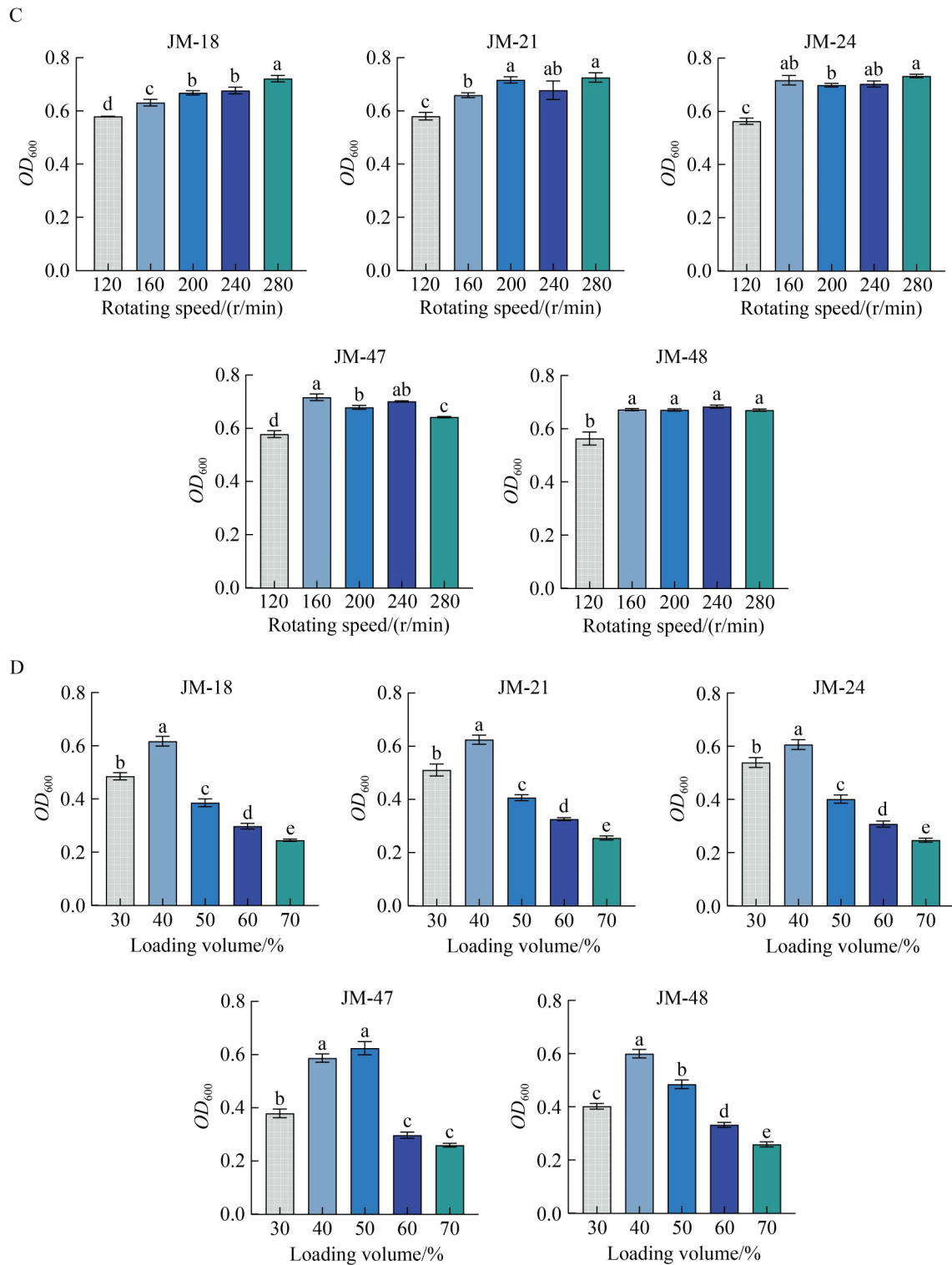
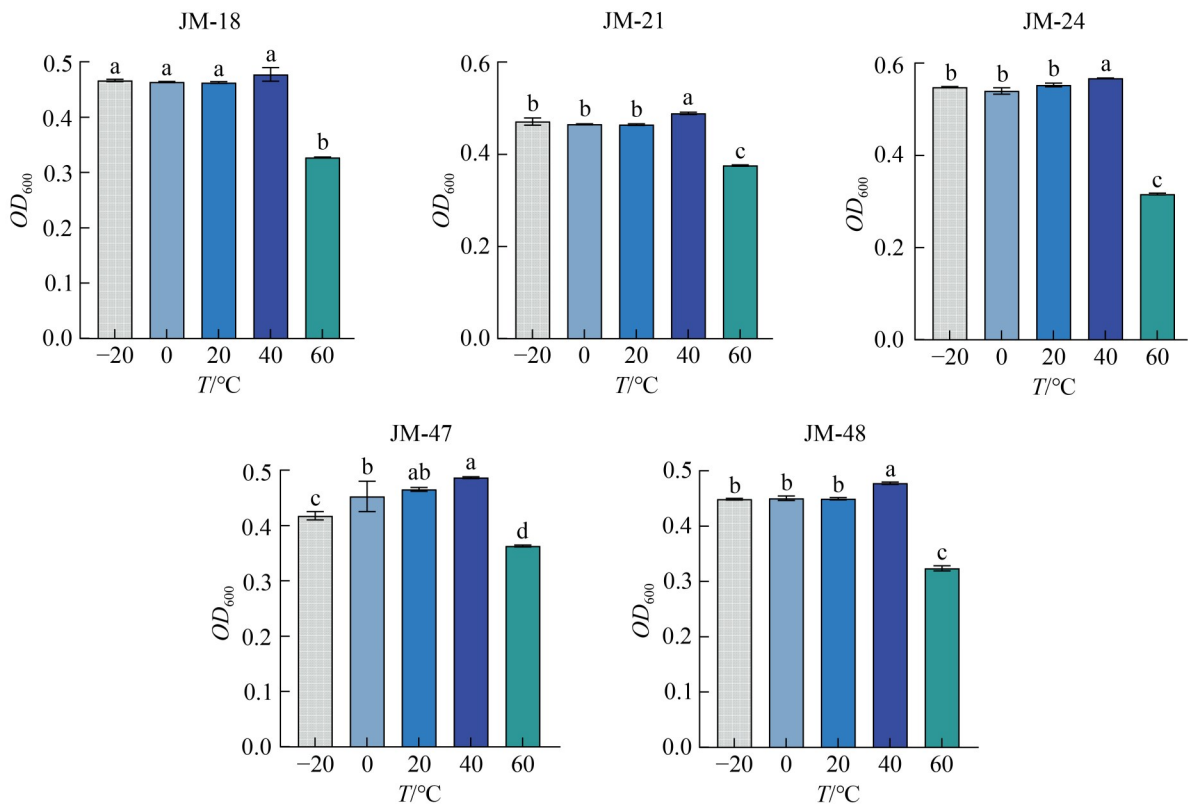


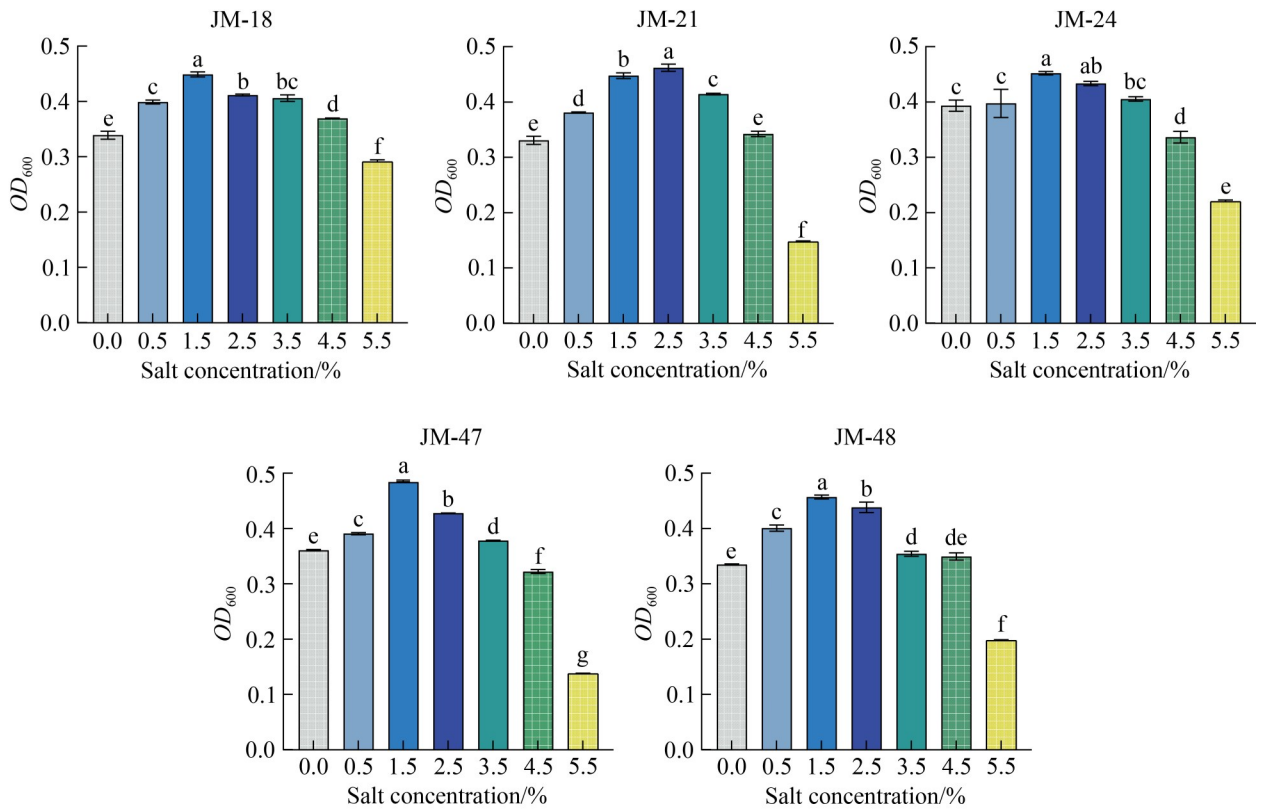
图4 五株菌的发酵条件优化

Figure 4 Fermentation condition optimization of the five strains. A: pH; B: Temperature; C: Fermentation speed; D: Medium volume. Different lowercase letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$).

A



B



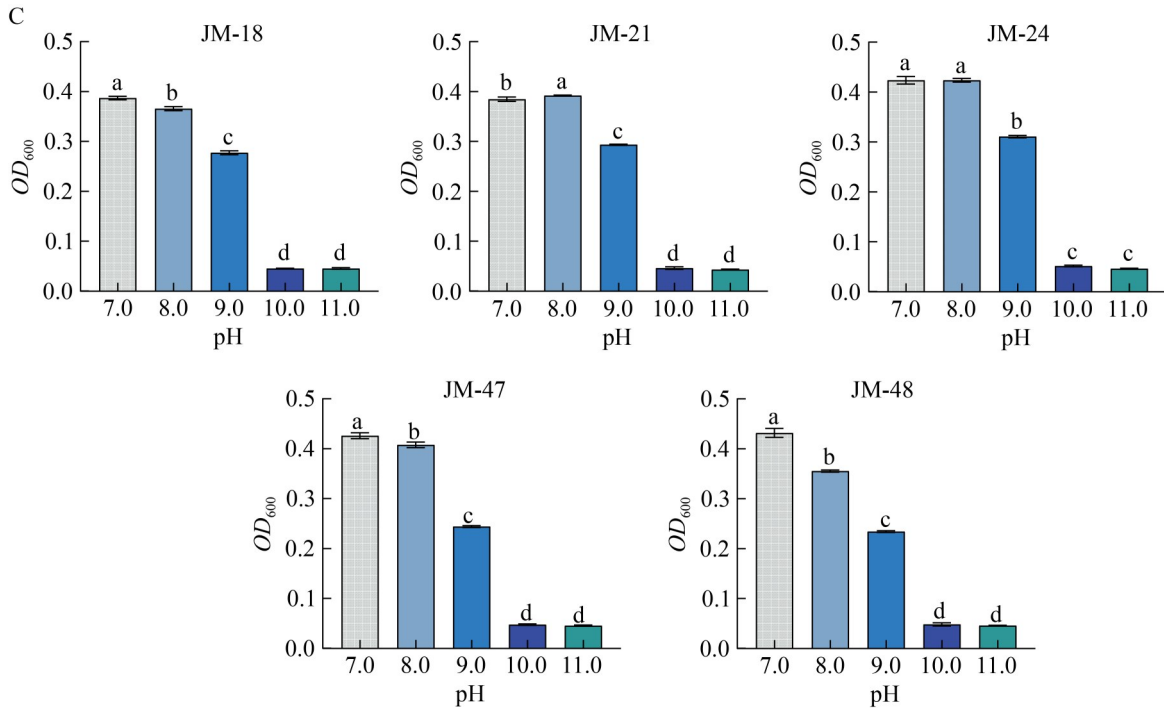


图5 五株促生菌的抗逆性

Figure 5 Stress tolerance of the five growth-promoting strains. A: Effect of high and low temperature stress on the growth of strains; B: Effect of salt stress on the growth of strains; C: Effect of alkali stress on the growth of strains. Different lowercase letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$).

表2 菌株相容性试验

Table 2 Strain compatibility test

Strain	JM-18	JM-21	JM-24	JM-47	JM-48
JM-48	+	+	+	+	
JM-47	+	+	+		
JM-24	+	+			
JM-21	+				
JM-18					

+: Compatibility between strains.

结果发现，经 SMC 处理后大豆种子的株高达 14.28 cm，与对照组差异极显著，两处理间种子的根长差异不显著(图 7A、7B)。对盆栽大豆的促生结果显示，相较于对照组，SMC 处理后盆栽大豆的生长势更好(图 7C)，经 SMC 处理后，苗期大豆的株高、根长、鲜重和干重均显著高于对照组，分别增长了 39.40%、93.31%、161.14% 和 163.57%(图 7D)。

3 讨论

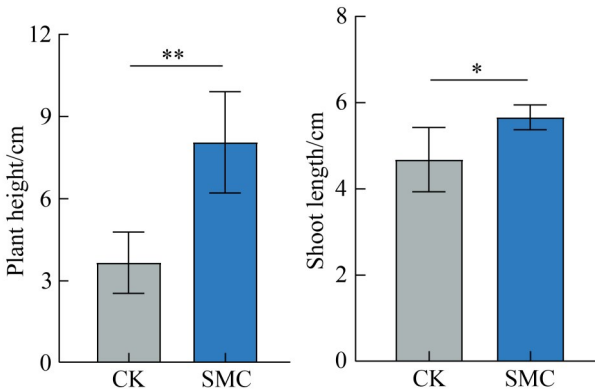
与单作相比，轮作模式不仅能增加作物产量，还能通过改变土壤微生物群落的丰度来改善土壤环境^[21]。闫非凡^[22]对玉米-大豆轮作后大豆产量及土壤微生物变化进行研究，发现轮作不仅使大豆产量明显上升，还使假单胞菌门(*Pseudomonadota*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)等土壤优势菌株的丰度显著上升。由此可见，从轮作土壤中挖掘潜力促生菌具有重要意义。本研究从轮作玉米根际土中成功筛选出 5 株同时具有固氮、产蛋白酶和产铁载体能力的放线菌，并进一步验证了构建合成菌群 SMC 的应用潜力，为开发针对轮作体系的微生物肥料奠定了菌种资源与理论基础。

节杆菌(*Arthrobacter*)作为 PGPR 家族中的重要成员，具有强大的环境适应性和代谢多

A



B



C



D

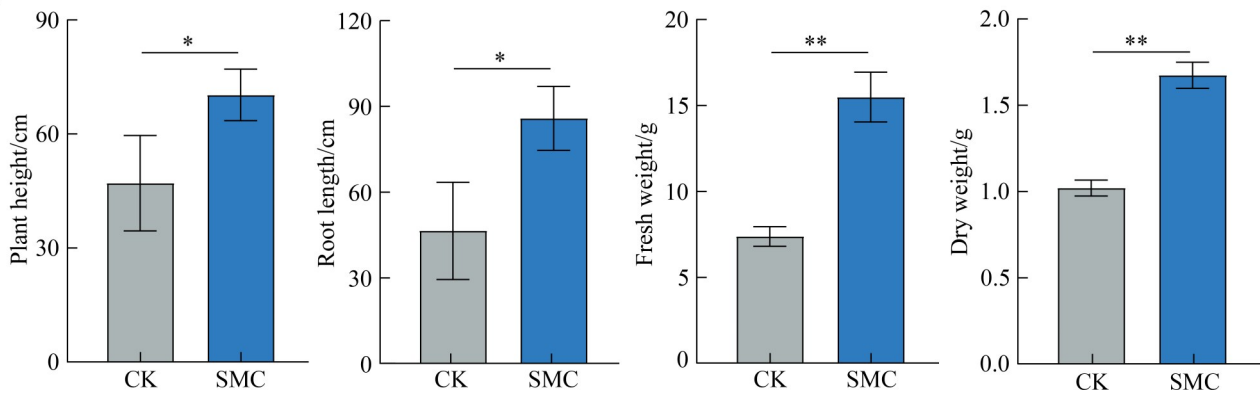


图6 合成菌群SMC对玉米生长的影响

Figure 6 Effect of compound bacteria SMC on the growth of maize. A: Effect of SMC on maize seeds (bar=2 cm); B: Effects of SMC on root length and shoot length of maize seeds; C: Effect of SMC on the growth of potted maize (bar=20 cm); D: Effects of SMC on the plant height, root length, fresh weight and dry weight of potted maize. * $P < 0.05$, the difference between groups was significant; ** $P < 0.01$, the difference between groups was extremely significant. The same below.

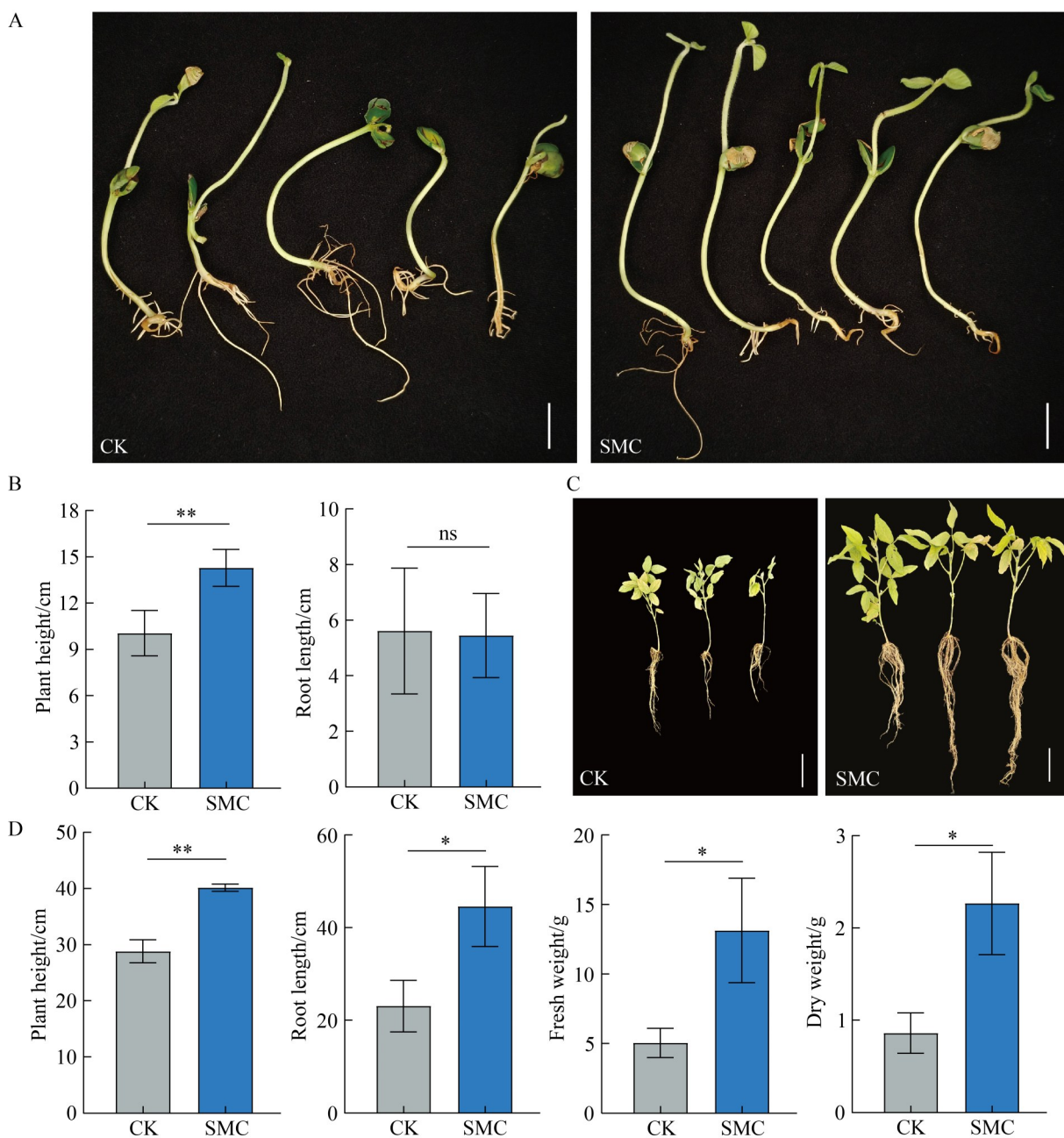


图7 合成菌群SMC对大豆生长的影响

Figure 7 Effect of compound bacteria SMC on the growth of soybeans. A: Effect of SMC on soybean seeds (bar=2 cm); B: Effects of SMC on root length and plant length of soybean seeds; C: Effect of SMC on the growth of potted soybeans (bar=10 cm); D: Effects of SMC on the plant height, root length, fresh weight, and dry weight of potted soybeans.

样性。众多研究对其促生特性进行了深入探索。Jiang 等^[23]从人参根际土中分离获得菌株 J139 (*A. nicotinovorans*, 现分类修订为 *Paenarthrobacter*

nicotinovorans), 该菌株能产生高浓度吲哚-3-乙酸(13.1 $\mu\text{g/mL}$), 同时具备解磷(164.2 $\mu\text{g/mL}$)、解钾(16.1 $\mu\text{g/mL}$)以及固氮的能力。Chhetri 等^[24]

从水稻根部分离获得一株节杆菌 GN70, 该菌株不仅高产 IAA、铁载体和生物膜, 还具有促进植物生长和抗病的双重潜力。李引等^[25]从花生根际土中分离获得菌株 L4 (*A. chlorophenolicus*, 现分类修订为 *Pseudarthrobacter chlorophenolicus*), 在培养 24 h 时其 IAA 产生量达 135.67 $\mu\text{g/mL}$, 同时具有解磷能力, 可显著促进花生的生长发育, 增加土壤 IAA 和有效磷含量。本研究从玉米根际土壤样品中筛选到的 5 株节杆菌, 分别为波卡利水稻节杆菌 (*A. pokkali*) JM-18 和 JM-21、水稻节杆菌 (*A. oryzae*) JM-24、*A. ginsengisoli* JM-47 和滋养节杆菌 (*A. pascens*) JM-48, 它们均具有一定的产蛋白酶、产铁载体和固氮能力, 相较于单一菌株, 合成菌群在竞争激烈的根际环境中更能够发挥优势作用, 本研究证实了节杆菌作为 PGPR 的应用潜力, 为微生物肥料的开发提供了候选菌株。

不同研究报告中 PGPR 菌株的促生能力存在一定差异。郭英等^[26]筛选获得 12 株促生菌, 对大豆株高、根长、地上部鲜重和干重的促生效果最高可分别达到 48.26%、26.33%、66.86% 和 66.67%。王喆琳^[27]将根瘤菌 Q8 与假单胞菌 1-4 联合接种, 协同增强了大豆的光合能力, 与对照组相比, 大豆株高、地上部干重、净光合速率及水分利用效率分别提高了 23.6%、24.7%、35% 和 30%。在玉米促生菌的研究方面, 侯莹莹等^[28]分离得到 3 株促生菌, 接种后使玉米株高、茎粗、干重和鲜重分别增长 36.99%、21.32%、170.14% 和 102.11%。白建飞等^[29]筛选的摩拉维亚假单胞菌 (*P. moraviensis*) GF-55 能够使玉米地上部株高、苗干重和苗鲜重分别增加 43.47%、26.67% 和 82.44%。本研究中, 经合成菌群 SMC 处理后, 玉米的株高、根长、鲜重和干重分别增长了 24.74%、48.21%、110.08% 和 64.05%; 大豆的株高、根长、鲜重和干重分别增长了 39.40%、93.31%、161.14% 和 163.57%, 促生效果可达到中高等水平, 这种

显著的促生效果可能源于 SMC 内菌株间的正向互动, 形成了协同增效的微生物生态循环。同时, 相较于单一菌株, 本研究开发的合成菌群理论上能够提供更稳定、更全面的促生服务, 具有一定的开发应用前景。

尽管本研究验证了合成菌群 SMC 在种子和盆栽试验中的显著促进作用, 但仍存在一定的局限性, 其在大田复杂环境下的实际促生效果及稳定性仍有待验证。其次, 本研究目前仅停留在表观促生效果层面, 对于 SMC 中各菌株之间的互作机制及其促生机制仍需进一步深入研究。最后, 高效菌剂是应用的基础, 本研究仍需进一步开展菌剂的规模化发酵生产、剂型加工与施用技术研究, 最终形成一套可操作、可推广的田间应用技术看方案。

4 结论

本研究从玉米-大豆轮作模式下玉米根际土壤样品中成功分离获得 5 株节杆菌, 即波卡利水稻节杆菌 (*A. pokkali*) JM-18 和 JM-21、水稻节杆菌 (*A. oryzae*) JM-24、*A. ginsengisoli* JM-47 和滋养节杆菌 (*A. pascens*) JM-48, 这些菌株同时具备产蛋白酶、产铁载体、固氮、解无机磷和产 NH_3 能力。5 株节杆菌在温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 与 -20 $^{\circ}\text{C}$ 、氯化钠浓度为 5.5%、pH 9.0 的条件下, 仍能保持较高活性。将这 5 株菌株复合施用后发现, 其能够显著促进玉米、大豆种子的萌发以及植株的生长发育。本研究为进一步开发适用于玉米、大豆的微生物肥料, 推动农业绿色可持续发展提供了新的研究方向。

作者贡献声明

乔梦可: 完成本研究的主体试验操作、论文撰写工作; 王黎明: 数据整理及处理; 李庭锋: 试验样品的采集任务; 张康: 指导实验安排并提供相关资源支持; 曹宏哲: 指导完成图片制作与数据处理; 邢继红: 进行实验指导, 并参与文章审阅与修改; 董金皋: 指导实验设计, 并获取资金支持。

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] Cui JW, Yang BG, Xu XP, Ai C, Zhou W. Long-term maize-soybean rotation in Northeast China: impact on soil organic matter stability and microbial decomposition[J]. *Plant and Soil*, 2025, 507(1/2): 141-158.
- [2] Wu JB, Hu SL, Chen J, Zhou LL, Yang SD, Zhou N, Wu L, Niu GQ, Zhang Y, Ren XS, Li QF, Yuan J, Song HY, Si J. Soil microbial legacy mediated by buckwheat flavonoids enhances cabbage resistance to clubroot disease[J]. *Microbiome*, 2025, 13: 176.
- [3] Khatoun Z, Huang SL, Rafique M, Fakhar A, Kamran MA, Santoyo G. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 273: 111118.
- [4] 马雪晴, 冀傲冉, 郑娇莉, 曹春霞, 龚艳, 黄大野, 王蓓蓓. 植物根际促生菌促生机制及其应用研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2025, 27(2): 13-23.
Ma XQ, Ji AR, Zheng JL, Cao CX, Gong Y, Huang DY, Wang BB. Research progress on growth-promoting mechanism and application of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(2): 13-23 (in Chinese).
- [5] Timofeeva AM, Galyamova MR, Sedykh SE. How do plant growth-promoting bacteria use plant hormones to regulate stress reactions?[J]. *Plants*, 2024, 13(17): 2371.
- [6] Bigatton ED, Ayoub I, Castillejo MÁ, Merlo C, Vázquez C, Archilla MV, Bruno M, Martín MP, Pizzolitto RP, Dubini LE, Lucini EI, Haro RJ. Plant growth-promoting rhizobacteria on peanut seedlings (*Arachis hypogaea* L.): isolation, taxonomical, and functional characterization[J]. *Oil Crop Science*, 2025, 10(2): 87-99.
- [7] 贾艺伟. 根际促生菌筛选鉴定及其对苹果连作土壤环境和植株幼苗生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
Jia YW. Screening and identification of plant-growth-promoting rhizobacteria and their effects on the soil environment under apple replanting and the growth of apple seedlings[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025 (in Chinese).
- [8] 杨晓帆, 梁家慧, 于文英, 吴雪莲, 李艳艳, 肖元松, 彭福田. 促生荧光假单胞菌对桃树根区土壤环境和植株生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1494-1508.
Yang XF, Liang JH, Yu WY, Wu XL, Li YY, Xiao YS, Peng FT. Effect of *Pseudomonas fluorescens* on rhizospheric soil quality and growth of peach (*Prunus persica* L. Batsch)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8): 1494-1508 (in Chinese).
- [9] Contreras-Cornejo HA, Macías-Rodríguez L, Cortés-Penagos C, López-Bucio J. *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2009, 149(3): 1579-1592.
- [10] Da Silva Sousa C, Soares ACF, da Silva Garrido M. Characterization of streptomycetes with potential to promote plant growth and biocontrol[J]. *Scientia Agricola*, 2008, 65(1): 50-55.
- [11] Liu X, Liao YQ, Shi ZF, Pu T, Shi ZL, Jia JP, Wang Y, He FF, Yang PW. Genomic and metabolomic insights into the antimicrobial activities and plant-promoting potential of *Streptomyces olivoreticuli* YNK-FS0020[J]. *Microorganisms*, 2025, 13(9): 1964.
- [12] 林海州, 陈洲琴, 王燕, 郭俊, 朱红惠, 邓名荣. 利用“移树养苗”策略挖掘粤蓝链霉菌隐性活性次级代谢产物[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(9): 145-152.
Lin HZ, Chen ZQ, Wang Y, Guo J, Zhu HH, Deng MR. Mining the cryptic bioactive secondary metabolites from *Streptomyces vietnamensis* using a ‘tree-removal’ strategy[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2017, 33(9): 145-152 (in Chinese).
- [13] 陈伟, 王小利, 付薇, 曾庆飞, 陈莹, 舒健虹. 黑麦草根际产铁载体细菌HMGY6B的筛选鉴定及对病原菌的拮抗作用[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(10): 2207-2215.
Chen W, Wang XL, Fu W, Zeng QF, Chen Y, Shu JH. Screening, identification and antagonistic against the pathogens of a siderophore-producing bacteria HMGY6B from rhizosphere of ryegrass[J]. *Microbiology China*, 2016, 43(10): 2207-2215 (in Chinese).
- [14] 王芳, 胡培毅, 李莎, 冯李鹏, 王瑶, 高莉. 玉米秸秆降解菌筛选鉴定及其盆栽试验对生土性能影响[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(12): 30-37.
Wang F, Hu PY, Li S, Feng LP, Wang Y, Gao L. Screening and identification of corn straw cellulose degradation strain and the effects on quality of immature soil in potted experiment[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(12): 30-37 (in Chinese).
- [15] 刘世杰. 枯草芽孢杆菌XZ1-5低温蛋白酶的酶学性质与功能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
Liu SJ. The enzymatic properties and functions of low-temperature protease from *Bacillus subtilis* XZ1-5[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025 (in Chinese).
- [16] 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.
- [17] 布坎南, 吉本斯. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 8版. 北京: 科学出版社, 1984.
Buchanan, Gibbons. *Bergey's manual of determinative bacteriology*[M]. 8th edition. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese).
- [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] 贾西贝, 王琦琦, 李杨, 褚贵新, 孙燕飞. 一株产吡啶乙酸耐盐促生菌的分离、鉴定及发酵条件优化[J]. *中国酿造*, 2019, 38(11): 37-42.

- Jia XB, Wang QQ, Li Y, Chu GX, Sun YF. Isolation, identification and fermentation conditions optimization of a salt-tolerant, growth-promoting and indoleacetic acid-producing bacterium[J]. *China Brewing*, 2019, 38(11): 37-42 (in Chinese).
- [20] 常慧萍, 邢文会, 夏铁骑, 杨雪, 付瑞敏, 王丁, 张红. 根际促生细菌的筛选及其对小麦幼苗的促生作用[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(12): 52-57.
Chang HP, Xing WH, Xia TQ, Yang X, Fu RM, Wang D, Zhang H. Screening of plant growth-promoting rhizobacteria and their growth-promoting effect on wheat seedling[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(12): 52-57 (in Chinese).
- [21] 崔福洋, 张乐, 张云, 李强, 陈晓露, 侯献飞, 苗昊翠, 顾元国, 贾东海. 棉花-花生轮作对产量及其土壤微生物群落基因功能的影响[J]. *西北农业学报*, 2025, 34(8): 1455-1466.
Cui FY, Zhang L, Zhang Y, Li Q, Chen XL, Hou XF, Miao HC, Gu YG, Jia DH. Effects of cotton-peanut rotation on yield and genetic functions of soil microbial communities[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2025, 34(8): 1455-1466 (in Chinese).
- [22] 闫非凡. 玉米-大豆轮作对大豆产量及土壤微生物群落的影响[D]. 延吉: 延边大学, 2021.
Yan FF. Effects of maize-soybean rotation on soybean yield and soil microbial community[D]. Yanji: Yanbian University, 2021 (in Chinese).
- [23] Jiang Y, Song Y, Jiang CY, Li X, Liu TT, Wang JR, Chen CQ, Gao J. Identification and characterization of *Arthrobacter nicotinovorans* J139, a novel plant growth-promoting rhizobacteria strain from *Panax ginseng*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 873621.
- [24] Chhetri G, Kim I, Kang M, So Y, Kim J, Seo T. An isolated *Arthrobacter* sp. enhances rice (*Oryza sativa* L.) plant growth[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(6): 1187.
- [25] 李引, 虞丽, 李辉信, 徐莉, 焦加国, 胡锋. 一株花生根际促生菌的筛选鉴定及其特性研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(4): 416-421.
Li Y, Yu L, Li HX, Xu L, Jiao JG, Hu F. Isolation, identification and characteristics of a peanut growth-promoting strain of rhizobacteria[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(4): 416-421 (in Chinese).
- [26] 郭英, 杨萍, 张丹雨, 刘莹莹, 马莲菊, 卜宁. 野大豆多功能根际促生菌的筛选鉴定和促生效果研究[J]. *生物技术通报*, 2018, 34(10): 108-115.
Guo Y, Yang P, Zhang DY, Liu YY, Ma LJ, Bu N. Screening, identification and growth-promoting effect of multifunction rhizosphere growth-promoting strain of wild soybean[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2018, 34(10): 108-115 (in Chinese).
- [27] 王喆琳. 植物根际促生菌与合成菌群对大豆抗逆促生特性的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
Wang ZL. Application of plant growth-promoting rhizobacteria and synthetic microbial communities in enhancing stress resistance and growth promotion in soybean (*Glycine max*)[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025 (in Chinese).
- [28] 侯莹莹, 胡小梅. 3株玉米根际解磷菌筛选鉴定及促生作用研究[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(5): 46-55.
Hou YY, Hu XM. Screening and identification of three strains of phosphate-solubilizing bacteria from maize rhizosphere and their roles in plant growth promoting effect[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(5): 46-55 (in Chinese).
- [29] 白建飞, 韩升才, 高聚林, 于晓芳, 青格尔, 胡树平, 张赛楠, 郭江岸. 内生菌莫拉维假单胞菌GF-55促进玉米生长和提高抗倒伏功能分析[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(7): 2625-2637.
Bai JF, Han SC, Gao JL, Yu XF, Qing GE, Hu SP, Zhang SN, Guo JA. Endophytic bacterial strain GF-55 improves the growth and lodging resistance of maize[J]. *Microbiology China*, 2022, 49(7): 2625-2637 (in Chinese).