

常海霞,李 静,李明源,等. 耐盐产吲哚乙酸(IAA)多功能菌株筛选及对盐胁迫小麦的促生效应[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(1): 9-20.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.01.002

耐盐产吲哚乙酸(IAA)多功能菌株筛选及对盐胁迫小麦的促生效应

常海霞, 李 静, 李明源, 茹仙古丽·尤努斯, 王继莲

(喀什大学生命与地理科学学院/新疆帕米尔高原生物资源与生态重点实验室, 新疆 喀什 844000)

摘要: 吲哚乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)是一种植物激素,对植物种子萌发、根系发育、生长及代谢都有着重要的调控作用。为丰富耐盐碱产 IAA 的多功能菌种资源,探究菌株的耐盐性及对盐胁迫下植物的促生效果,本研究从新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州盐生植物根际、根内、土壤中筛选高产 IAA 的多功能菌株,从中选取产 IAA 能力较强的优良菌株接种于盐胁迫下的小麦幼苗验证其促生能力。结果共分离到 181 株产 IAA 菌株,其中MHCA37、MPCB16、MHCA17 菌株分泌 IAA 的量位居前 3 位。将具有 IAA 分泌能力的菌株进行聚合酶链反应-限制性内切酶片段长度多态性(PCR-RFLP)分析后,选取代表性菌株进行 16S rRNA 基因测序,结果显示,所有菌株隶属 6 个菌属,以肠杆菌(*Enterobacter*)占比最高。产 IAA 菌株对不同浓度盐胁迫下小麦地上部分和地下部分的影响不同,在 150 mmol/L NaCl 胁迫下,接种 MHCA37、MPCB16 和 MHCA17 菌株的小麦在茎粗、株高、根干重、地上部分干重、叶绿素含量 5 个方面均显著高于对照;接种 MHCA37 菌株后小麦幼苗过氧化氢酶(CAT)活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA17 菌株的小麦超氧化物歧化酶(SOD)活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA37 菌株后小麦幼苗过氧化物酶(POD)活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 时显著高于对照,接种 MHCA17 菌株的小麦幼苗 POD 活性在 NaCl 浓度为 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA37、MPCB16、MHCA17 菌株的小麦幼苗在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 轻度盐胁迫下丙二醛(MDA)含量均显著低于对照。据此推测,本研究筛选所得的产 IAA 菌株在盐胁迫下促进植物生长,提高植物抗逆性等方面有较大应用潜力,同时为开发适用于盐碱地的耐盐多功能微生物菌剂提供了理论依据。

关键词: 吲哚乙酸; 多功能菌株; 盐胁迫; 促生效应

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2025)01-0009-12

Screening of multifunctional salt-tolerant indole-3-acetic acid (IAA)-producing strains and their growth-promoting effects on wheat under salt stress

CHANG Haixia, LI Jing, LI Mingyuan, Ruxiangul · YUNUS, WANG Jilian

(College of Life and Geographic Sciences, Kashi University/Key Laboratory of Biological Resources and Ecology of Pamirs Plateau in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi 844000, China)

Abstract: As a plant hormone, indole-3-acetic acid (IAA) plays an important role in plant seed germination, root development, growth and metabolism. To enrich the resources of IAA-producing strains and investigate their growth-promoting effects under salt stress, multifunctional strains with IAA-producing ability were screened from halophytes in

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160408)

作者简介: 常海霞(1999-), 女, 新疆奎屯人, 硕士研究生, 主要从事
农用微生物资源研究。(E-mail) chang_0513@163.com

通讯作者: 王继莲, (E-mail) wjilian0710@sina.com

saline-alkali land of Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region. Then the excellent strains were selected and inoculated into wheat seedlings under salt stress to verify their growth-promoting ability. As a result, a total of 181 IAA-producing strains

were isolated, among which MHCA37, MPCB16, and MHCA17 were the top three in terms of IAA secretion. The strains with IAA secretion ability were analyzed by polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism (PCR-RFLP), and the representative strains were selected for 16S rRNA gene sequencing. The results showed that all strains belonged to six genera, and *Enterobacter* was the dominant genus. The effects of IAA-producing strains on the aboveground and underground parts of wheat under different salt stresses were different. Under 150 mmol/L NaCl stress, the stem diameter, plant height, root dry weight, shoot dry weight and chlorophyll content of wheat inoculated with MHCA37, MPCB16 and MHCA17 were significantly higher than those of the control. The catalase (CAT) activity of wheat seedlings inoculated with MHCA37 under 150 mmol/L and 200 mmol/L NaCl treatments was significantly higher than that of the control. The superoxide dismutase (SOD) activity of wheat inoculated with MHCA17 under 150 mmol/L and 200 mmol/L NaCl treatments was significantly higher than that of the control. The peroxidase (POD) activity of wheat seedlings inoculated with MHCA37 strain under 150 mmol/L NaCl treatment was significantly higher than that of the control. The POD activity of wheat seedlings inoculated with MHCA17 strain under 200 mmol/L NaCl treatment was significantly higher than that of the control. The malondialdehyde (MDA) content of wheat seedlings inoculated with MHCA37, MPCB16 and MHCA17 strains under 150 mmol/L NaCl mild salt stress was significantly lower than that of the control. It is speculated that the IAA-producing strains screened in this study have great application potential in promoting plant growth and improving plant stress resistance under salt stress. At the same time, the results of this study provide a theoretical basis for the development of salt-tolerant multifunctional microbial agents suitable for saline-alkali land.

Key words: indole-3-acetic acid; multifunctional strains; salt stress; growth-promoting effect

土壤盐渍化通常是指由自然条件和人类活动共同作用而造成的土壤盐分含量过高的现象,属于非生物胁迫之一^[1]。盐分的过度积累会严重影响土壤的结构和功能,不仅严重制约农业经济发展,还会威胁生态环境稳定。数据表明,中国盐碱地面积约 $9.913 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中新疆所占比例极高,达 22.01%,主要分布在南疆地区^[2]。新疆干旱的气候条件和独特的内陆地形造成聚积在土壤表层的盐分难以淋溶,因此土壤中盐分浓度逐年升高,再加上近年来不合理的土地开发利用,进一步加剧了土壤盐渍化^[3]。在此背景下,亟待开拓一种能有效改良利用盐渍土地、增强植物抗性的新思路,为中国内陆干旱地区农业生态环境保护提供理论基础。

研究结果证实,植物促生菌 (PGPB) 是一类有益菌,能够与植物互利共生,增加土壤肥力,提高植物对环境和生物胁迫的耐受性,兼具环境友好和经济高效的优势,已经成为可持续化农业生产中被广泛关注的生物资源^[4]。盐生植物中蕴含着丰富的耐盐微生物类群,部分微生物能合成和分泌植物激素,或经固氮、溶磷等作用提高土壤营养元素含量,进一步促进植物的生长发育^[5]。吲哚乙酸 (IAA) 作为最常见的一类植物激素,能够通过调控细胞膜电子通道和质子通道进而调节植物细胞生长和分化,达到增强植物抗逆性的目的^[6]。杨平等^[7]研究发现,棉花种子经 IAA 引发后,幼苗中超氧化物歧化

酶 (SOD) 活性和过氧化物酶 (POD) 活性显著增强,丙二醛 (MDA) 含量降低,从而提高了棉花幼苗的耐盐性;韦廷舟等^[8]研究发现,*Bacillus* sp. ST37 能够通过分泌 IAA 等多种促生活性物质缓解盐胁迫对油菜种子和幼苗的损伤;Li 等^[9]研究发现,分离自花生根际的产 IAA 菌株 *Enterobacter cloacae* HSNJ4 在盐胁迫下可明显提高植物叶片中脯氨酸 (Pro) 含量,增强其抗氧化酶活性^[9]。目前产 IAA 菌株资源已有不少报道,但多数产 IAA 菌株因环境适应性差、在不同宿主植物根际定殖不稳定等问题导致其在农业应用中广谱性不强。因此,持续开展耐盐产 IAA 菌种资源的分离筛选和应用显得尤为重要。

本研究从新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州优势盐碱植物根际筛选高产 IAA 的多功能菌株,探究其耐盐特性,并考察其对盐胁迫下小麦生长的影响,旨在丰富能有效提高作物抗逆性的多功能菌种资源,为耐盐高产 IAA 促生菌的开发及在盐碱地区的合理应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 样品采集 采集地位于新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州阿图什市格达良乡 ($76^{\circ}36'32''\text{E}$, $39^{\circ}47'58''\text{N}$), 该地区常年干旱,蒸发量大,盐碱地面积大。2022 年 10 月中旬,共采集 3 种耐盐碱植物旱生芦

苇(*Phragmites Australis*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)和盐穗木(*Halostachys caspica*)的根系及根际土壤样品。采集方法为多点混合采样法,除去表层盐碱结晶及覆土,整体挖出植物地下部分及根际土壤,−4℃低温保存,后续进行菌株分离筛选。

1.1.2 培养基 菌株分离采用 LB 培养基^[10];检测产 IAA 能力采用金氏(King's B)培养基^[11];固氮能力检测采用 Ashby 培养基^[12];检测产铁载体能力采用 CAS 检测培养基^[13];测定溶磷能力分别采用 NBRIP 无机磷培养基和蒙金娜(Mongina)有机磷培养基^[14];1-氨基环丙烷-1-羧酸(Aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)的定性分析联合使用 DF 培养基和 ADF 培养基^[15]。半固体培养基:Ca₃(PO₄)₂ 5.000 g/L,琼脂 2.000 g/L,霍格兰营养液 1.215 g/L。

1.2 试验方法

1.2.1 菌株筛选

1.2.1.1 根际土壤菌株分离 称取 3 种耐盐植物的根际土壤样品各 10 g,加入适量无菌水振荡 30 min 制成土壤悬浮液,10 倍梯度稀释后涂布于 LB 培养基,28℃条件下培养 48~60 h。观察不同菌落的形态特征,多次划线纯化培养得到单菌落。

1.2.1.2 根内生菌菌株分离 在无菌条件下,将根系样品常规消毒后用无菌水冲洗 2~3 次,再用滤纸吸干表面水分,充分研磨,静置得到菌悬液。将菌悬液梯度稀释,涂布于 LB 培养基,28℃条件下培养 36 h,观察记录各菌落的形态特征,并划线纯化培养得到单菌落。

1.2.2 产 IAA 菌株筛选及能力测定 将分离纯化得到的菌株接种于 King's B 培养基,28℃、160 r/min 振荡培养 3 d 后,10 000 r/min 离心 10 min。在上清液中加入 Salkowski 显色剂,以未接菌的 King's B 液体培养基为对照,37℃避光放置 30 min,若颜色呈现粉色则表示其为阳性菌株,能分泌 IAA,测定阳性菌株在 530 nm 处的吸光度(OD_{530})^[16]。同上述方法,以不同浓度的 IAA 稀释液(0 μg/mL、10 μg/mL、20 μg/mL、30 μg/mL、40 μg/mL、50 μg/mL、60 μg/mL)绘制标准曲线,计算菌株 IAA 分泌量。

1.2.3 菌株鉴定 用裂解液(Lysis buffer for micro-organism to direct PCR, TaKaRa)提取菌株的基因组 DNA,采用 16S rRNA 通用引物 27 F 和 1492 R 扩增细菌 16S rDNA 基因^[14]。所得 PCR 产物经 *Msp* I 和 *Hae* III 酶切后,用 DPS 软件进行聚类分析,挑选代表菌株送至生物公司进行测序,将返回的序列进行同

源比对,并通过 MEGA 软件的 Neighbor-Joining 法构建系统发育树。

1.2.4 优良菌株的耐盐能力测定 选取 IAA 分泌量位居前 10 的菌株接种至 LB 液体培养基,28℃、180 r/min 振荡培养 48 h,将菌液的 OD_{600} 统一调整为 0.6~0.8。配置不同含量 NaCl 溶液(2.5%、5.0%、7.5%、10.0%、12.5%、15.0%)的 LB 固体培养基,吸取 10 μL 菌液接种在不同 NaCl 含量的 LB 固体培养基上,28℃倒置培养 7 d,每天记录菌株生长状况。

1.2.5 其他促生性能测定

1.2.5.1 固氮能力测定 用无菌牙签将菌株点接于 Ashby 培养基中培养 3 d,观察菌株长势,能在培养基上正常生长的菌株视为有固氮能力^[12]。菌株的固氮能力参照微生物固氮酶检测试剂盒(上海源桔生物科技中心产品)的相关说明进行测定。

1.2.5.2 产铁载体能力测定 用无菌牙签将菌株点接于 CAS 检测培养基上,28℃条件下培养 4 d,观察菌落周围是否生成橙色晕圈,有橙色晕圈的菌株即为具备产铁载体能力的阳性菌株^[13]。将能够产铁载体的菌株转接于 CAS 液体培养基中,28℃、180 r/min 培养 72 h。取培养液 10 mL,12 000 r/min 离心 15 min 后将上清液与 CAS 检测液等比例混匀,避光静置 30 min,测定 $OD_{630}(A_s)$ 。另取空白培养基测定 $OD_{630}(A_r)$,根据 A_s/A_r 值计算产铁载体能力大小^[17]。

1.2.5.3 溶磷能力测定 将菌株分别接种于 NBRIP 无机磷培养基和 Mongina 有机磷培养基,30℃恒温培养 72 h,观察是否有溶磷圈形成^[18]。将解磷菌株接种于 LB 液体培养基中振荡培养 24 h,按一定比例分别转接至 Mongina 和 NBRIP 液体培养基中,28℃、180 r/min 培养 5~7 d 后,12 000 r/min 离心 10 min,取上清液通过钼锑抗比色法测定有效磷含量^[10]。

1.2.5.4 产 ACC 脱氨酶菌株的 ACC 脱氨酶活力测定 将待测菌株接种于 LB 液体培养基,28℃、180 r/min 培养 48 h 后,按一定比例转接至 DF 和 ADF 培养基中,28℃、180 r/min 培养 72 h,测定菌液 OD_{600} 。连续 5 次传代培养,若菌株在 ADF 培养基中 OD_{600} 值始终大于 DF 培养基中 OD_{600} 值,则视为有产 ACC 脱氨酶能力。采用 Bradford 法^[19]和 Penrose 法^[15]测定菌株的 ACC 脱氨酶活性。

1.2.6 植物促生试验 选取产 IAA 能力强且兼具多种促生性能的 3 株优势菌株进行接种,采用双因素试验设计。因素 1:产 IAA 促生菌液接种,以不加菌的

空白培养基为对照(CK);因素 2:NaCl 浓度,设置 3 个处理,分别为 150 mmol/L、200 mmol/L 和 300 mmol/L,每个处理 5 次重复,配置半固体培养基,对健康饱满的新冬 20 小麦种子先后用 70%乙醇、3%次氯酸钠消毒冲洗后,用无菌水浸泡 3 d 进行催芽,将大小一致的种子垂直插入装有半固体培养基的组培瓶中,每个瓶中均匀分布 6 粒,置于 28 ℃光照培养箱中(光照 12 h/黑暗 12 h)培养。供试菌液浓度为 1×10^8 CFU/mL,每隔 5 d 灌根一次,培养 30 d 后收获,测定其农艺性状,采用分光光度法测定幼苗叶绿素含量^[20],TBA 法测定叶片 MDA 含量^[21],叶片 *POD*、*CAT*、*SOD* 活性均按照相关检测试剂盒说明书测定。

2 结果与分析

2.1 产 IAA 菌株的筛选及能力测定

从 3 种盐生植物根际、根内和土壤中共分离出

304 株菌株,基于 Salkowski 显色反应从中筛选出具有产 IAA 能力的菌株 181 株,包括根际 61 株、土壤 63 株,根内 57 株;分离自盐穗木的菌株数量(79 株)高于盐节木(56 株)和旱生芦苇(46 株)(表 1)。所得菌株产 IAA 量介于 9.7~38.9 mg/L,其中达 25 mg/L 以上的菌株共有 20 株,菌株 MHCA37、MPCB16、MHCA17 分泌 IAA 的量位居前 3 位(表 2)。

表 1 3 种盐生植物中分离得到的产吲哚乙酸菌株
Table 1 Indole-3-acetic acid-producing strains isolated from three saline plants

样品来源	分泌 IAA 菌株数量(株)			
	根际	根内	土壤	总计
旱生芦苇	13	10	23	46
盐穗木	27	26	26	79
盐节木	21	21	14	56

IAA:吲哚乙酸。

表 2 不同菌株分泌吲哚乙酸的能力

Table 2 The ability of different strains to secrete indole-3-acetic acid

菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)	菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)	菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)	菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)
MHCA37	38.90±3.56	NHCC24	21.30±1.64	AHCA23	17.90±2.13	AHSA11	15.80±2.48
MPCB16	31.80±2.53	AHCB56	21.30±2.10	MHSB72	17.90±1.26	MHCC66	15.70±1.96
MHCA17	30.00±4.92	MHSA1	21.20±2.36	MHCA6	17.90±1.08	AHCC37	15.70±1.58
MHCB30	29.40±1.64	MHCC23	21.20±2.15	MHCB24	17.80±2.56	MHCB36	15.60±1.49
MHCB33	29.20±2.82	NHCA4	21.10±1.26	MHCA35	17.80±2.35	AHSA41	15.60±3.09
NPCC14	28.90±4.51	NPCC16	21.10±1.25	APCC20	17.80±1.49	MHCA25	15.50±2.07
MHCA60	28.40±2.17	APCB64	21.00±1.48	MPCA48	17.80±2.36	MPCA89	15.50±2.85
MPCB32	28.30±2.89	NPCC39	20.90±1.56	MHCB56	17.70±1.24	NHCA11	15.50±1.96
MPCA49	28.10±3.43	NHCA1	20.80±1.49	MPCC58	17.70±1.98	AHCC28	15.50±1.45
MPCA94	27.80±1.91	NHSA33	20.80±1.87	NHCC27	17.60±1.93	NHSA9	15.40±1.65
MHCC68	27.60±1.78	NPCC19	20.70±2.16	MHCB50	17.50±2.26	MHSA7	15.20±1.28
MHSB59	27.40±2.17	AHCA52	20.70±1.26	AHSC35	17.50±3.10	AHSC14	15.20±3.21
MPCC93	27.30±3.44	NPCC21	20.60±2.14	NHCB32	17.40±3.25	AHSB46	15.20±2.59
MHCB34	27.10±2.49	MHCA12	20.50±1.69	NHCC5	17.40±1.56	MHSB22	15.10±2.84
MHSB28	26.80±1.92	MHCB38	20.50±1.87	APCA45	17.30±2.48	NPCC12	15.10±1.55
MHCA19	26.70±4.37	MHSB46	20.50±2.63	AHCB57	17.30±1.69	MHCA18	15.00±1.96
MHCA40	26.20±2.12	NHCC42	20.50±2.54	MHCB54	17.30±1.48	NHSB2	15.00±2.84
MHSB2	26.10±2.54	MHSA43	20.40±2.16	NPCC18	17.20±2.45	NHSB17	15.00±2.74
MHSB91	25.70±3.47	MHCC63	20.40±2.87	MPCB86	17.20±1.56	MPCC64	14.90±2.36
MHSB10	25.20±1.96	MPCA47	20.30±1.63	MHSC95	17.20±1.48	MHCC52	14.60±2.51
MHSC29	24.70±1.77	NHCA44	20.30±3.12	AHCC17	17.10±1.26	AHSC34	14.60±2.54
MHSB81	24.50±5.34	MHCA31	20.20±1.26	NHCB15	17.10±3.21	AHCC60	14.60±1.26

续表2 Continued2

菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)	菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)	菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)	菌株	分泌的 IAA 量 (mg/L)
MHCA44	24.30±2.67	MHCC14	20.10±2.15	NPCC40	17.00±3.06	NPCC41	14.40±2.59
MPCB11	23.80±1.32	MHSA85	20.00±3.15	NHCB13	16.90±3.15	MHSC55	14.30±3.21
MHCC3	23.70±1.52	NHSA3	19.90±1.36	MHSC79	16.90±2.19	MHSA5	14.20±3.16
MHCC21	23.70±2.48	MHCB39	19.80±1.45	AHCB30	16.80±2.59	APCC55	14.20±2.59
NHCC7	23.70±1.56	APCC21	19.40±2.21	MHSA74	16.80±1.26	NHCC26	14.10±2.48
MPCA69	23.40±1.74	MPCB62	19.30±1.36	MHCA26	16.70±3.24	MHSC57	14.00±2.66
MPCA13	23.00±1.97	MHSB71	19.30±1.69	MHCB51	16.70±1.59	NHSA34	14.00±1.48
AHSB15	22.80±2.12	MHSC92	19.30±1.87	MPCA76	16.70±1.48	MHSC8	13.90±2.26
AHCC33	22.80±2.64	NHSA29	19.30±2.56	MPCB88	16.70±2.56	MHCC87	13.90±2.54
MHSA90	22.70±1.69	APCC25	19.30±1.98	NHCC35	16.70±3.02	MHCB73	13.80±2.78
NHCA22	22.70±1.71	MPCB80	19.10±1.56	NPCC10	16.50±1.28	AHSB16	13.50±2.96
APCA51	22.50±1.57	MPCB41	18.80±1.36	AHCA39	16.50±1.49	MHSA82	12.80±1.56
MHCA45	22.30±1.54	MPCC78	18.80±1.54	AHCA40	16.40±3.21	NHSA30	12.80±1.99
MHCB96	22.20±2.12	NPCC6	18.80±1.26	NHCC20	16.30±3.63	AHCC22	12.00±2.49
MHSA20	22.10±1.56	MHCB15	18.50±2.13	AHSB32	16.30±3.25	MHSC65	11.80±1.78
MHSB53	22.00±2.54	APCC62	18.50±2.46	APCB61	16.30±1.26	APCC63	11.70±2.15
NHCB31	21.90±1.68	MHSB27	18.40±2.49	MHSC61	16.20±3.54	AHSB48	11.60±1.69
AHCA24	21.90±1.49	MHCA42	18.40±1.26	MHSA83	16.20±3.12	AHSC13	10.70±1.36
MHCB77	21.70±1.26	AHCC27	18.40±1.36	MHSA9	16.10±1.26	AHSC49	10.20±1.12
NHCC8	21.60±2.32	AHCA53	18.30±2.35	MHCB67	16.10±1.58	AHSB36	10.00±1.06
MHCB75	21.40±1.32	AHSB29	18.30±2.15	NHSA36	16.00±1.49	APCA12	9.70±1.48
MPCC97	21.40±1.49	NHSA43	18.20±2.14	AHCB44	16.00±1.78		
APCA50	21.40±1.87	MHCB70	18.00±1.74	MPCA84	15.80±2.16		
MHCC4	21.30±1.96	NPCC25	17.90±1.96	AHCA43	15.80±2.15		

表中数据为平均值±标准差。IAA:吲哚乙酸。

2.2 菌株鉴定

将具有 IAA 分泌能力的 181 株菌株经 PCR-RFLP 分析后,挑取代表性菌株进行 16S rRNA 基因测序(图 1)。所得菌株分属于 6 个菌属,其中肠杆菌属(*Enterobacter*)菌株占总菌株数的 78.12%,为绝对优势属菌株;埃希氏菌属(*Escherichia*)菌株占 9.38%;不动杆菌属(*Acinetobacter*)菌株、嗜盐单胞菌属(*Halomonas*)菌株、鞘脂菌属(*Sphingobium*)菌株及农杆菌属(*Agrobacterium*)菌株各占 3.13%。产 IAA 能力位居前 3 的菌株 MHCA37、MPCB16、MHCA17 分别被鉴定为肠杆菌属、鞘脂菌属和埃希氏菌属。

2.3 分泌 IAA 菌株的耐盐能力

对分泌 IAA 能力居前 10 位的菌株进行耐盐能力测定,结果表明,NaCl 含量为 2.5%、5.0%、7.0% 时 10 株菌株均长势良好;NaCl 含量为 10.0% 时,菌株 MHCB33 和 MHCA17 长势良好,MPCA94、

NPCC14 长势较弱;NaCl 含量为 12.5% 时,除菌株 MHCB33 外,其他菌株均无法正常生长,NaCl 含量为 15.0% 时,所有菌株均无法正常生长(表 3)。

2.4 促生性能

将分泌 IAA 能力居前 10 位的菌株进行发酵培养,测定其他促生性能,结果如表 4 所示。除 NPCC14、MPCA94 外,其余菌株均具有两种及两种以上促生能力。分别具有固氮、产 ACC 脱氨酶、产铁载体、分解无机磷和分解有机磷能力的菌株有 4 株、3 株、6 株、3 株、7 株,其中 MHCA37 兼具固氮和溶有机磷性能,MPCB16 兼具固氮、产 ACC 脱氨酶、产铁载体和溶无机磷能力,MHCA17 兼具产 ACC 脱氨酶、产铁载体、溶无机磷和分解有机磷能力。综上,MHCA37、MPCB16 和 MHCA17 应用潜力较大,作为目的菌株进行后续促生试验。

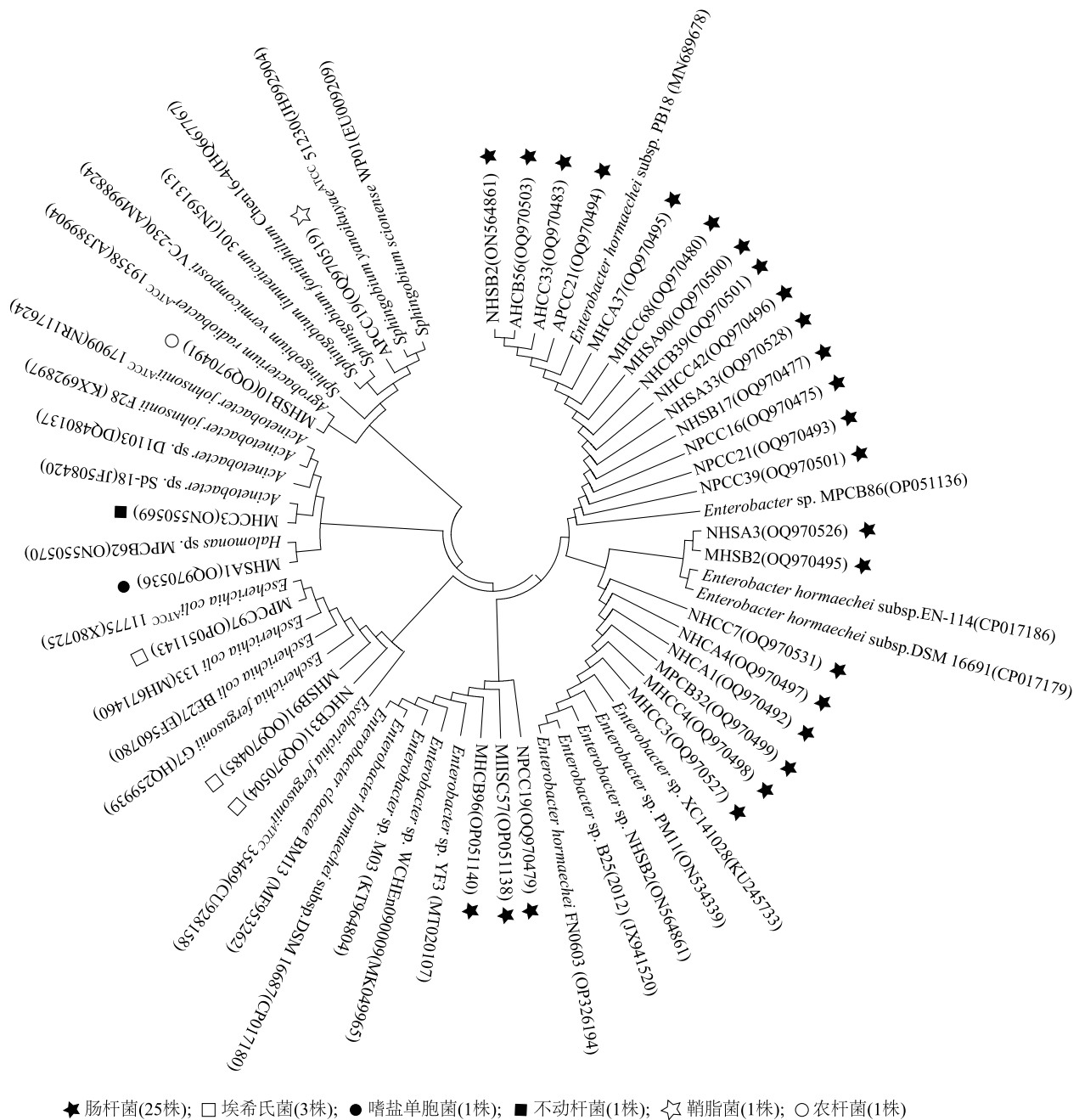


图1 基于 16S rRNA 基因的产吲哚乙酸优势菌株的系统发育树

Fig.1 Phylogenetic tree of indole-3-acetic acid-producing dominant strains based on 16S rRNA gene

2.5 盐胁迫下产 IAA 菌株对小麦的促生效果

如图2、图3所示,在 150 mmol/L NaCl 胁迫下,接种 MHCA37、MPCB16 和 MHCA17 菌株的小麦在茎粗、株高、根干重、地上部分干重、叶绿素含量 5 个方面均显著高于对照。200 mmol/L NaCl 胁迫下,除了接种 MHCA17 菌株的小麦株高和叶绿素含量显

著高于对照,接种 MHCA37 和 MPCB16 菌株的小麦与对照相比促生效果均不显著。300 mmol/L NaCl 胁迫下,接种 MHCA37 和 MPCB16 菌株的小麦茎粗显著高于对照,接种 MPCB16 菌株的小麦株高显著高于对照,接种 MHCA17 菌株的小麦地上部分干重和叶绿素含量显著高于对照。

表 3 10 株优势菌株的耐盐能力测定结果

Table 3 Determination of salt tolerance of 10 dominant strains

菌株	2.5% NaCl	5.0% NaCl	7.0% NaCl	10.0% NaCl	12.5% NaCl	15.0% NaCl
MHCA37	+++	++	++	-	-	-
MPCB16	++	++	++	-	-	-
MHCA17	+++	+++	++	++	-	-
MHCB30	++	++	+	-	-	-
MHCB33	++	++	++	++	+	-
NPCC14	++	++	++	+	-	-
MHCA60	+++	++	++	-	-	-
MPCB32	++	++	++	-	-	-
MPCA49	++	++	+	-	-	-
MPCA94	++	++	+	+	-	-

+++表示 1.0 cm<菌落直径<1.5 cm; ++表示 0.5 cm<菌落直径<1.0 cm; +表示菌落直径<0.5 cm;-表示菌落受到抑制。

表 4 优势菌株的其他促生性能测定结果

Table 4 Determination of other growth-promoting properties of dominant strains

菌株	固氮酶活性 (U/L)	ACC 脱氨酶活性 (U/mg)	产铁载体能力 (A_s/A_r)	无机磷溶磷量 ($\mu\text{g/mL}$)	有机磷溶磷量 ($\mu\text{g/mL}$)
MHCA37	16.21±0.36	-	-	-	2.45±0.06
MPCB16	17.02±0.03	31.80±1.23	0.119±0.020	57.27±2.40	-
MHCA17	-	0.60±0.06	0.177±0.080	76.49±3.15	5.16±0.99
MHCB30	-	-	0.126±0.020	-	30.33±1.15
MHCB33	15.18±0.31	-	-	-	4.47±0.60
NPCC14	-	-	0.121±0.030	-	-
MHCA60	-	3.34±0.87	0.143±0.050	66.47±3.11	-
MPCB32	-	-	0.102±0.040	-	5.66±0.56
MPCA49	17.09±0.16	-	-	-	3.59±0.51
MPCA94	-	-	-	-	7.75±0.70

表中数据均为平均值±标准差;-表示阴性菌株,不具有此项促生能力。

2.6 分泌 IAA 菌株对小麦生理特性的影响

POD、*CAT* 和 *SOD* 是植物组织中普遍存在的活性酶,这些酶活性高低反映了植物体内代谢及抗逆性的变化(图 4)。接种 MHCA37 菌株后小麦幼苗 *CAT* 活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA37、MPCB16、MHCA17 菌株的小麦 *SOD* 活性随着 NaCl 浓度的升高整体呈上升之势,接种 MHCA17 菌株的小麦幼苗在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时 *SOD* 活性显著高于对照,接种 MPCB16 菌株的小麦幼苗在 NaCl 浓度为 200 mmol/L 时 *SOD* 活性显著高于对照;接种 MHCA37 菌株后小麦幼苗 *POD* 活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 时显著高于对照,接种 MHCA17 菌株的

小麦幼苗在 NaCl 浓度为 200 mmol/L 时 *POD* 活性显著高于对照。

MDA 一方面能与蛋白质、核酸产生交联作用,使之丧失生物功能,另一方面可使植物纤维素分子间的桥键松弛或直接抑制蛋白质合成,因此 MDA 的过量积累会对植物细胞造成一定的损伤,导致植物抗逆性降低。接种 MHCA37、MPCB16、MHCA17 菌株的小麦幼苗在 150 mmol/L NaCl 低浓度盐胁迫下 MDA 含量均显著低于对照;接种 MHCA37、MPCB16 菌株的小麦幼苗在 200 mmol/L NaCl 中浓度盐胁迫下 MDA 含量显著低于对照;在 300 mmol/L NaCl 高浓度盐胁迫下只有接种 MHCA17 菌株的小麦幼苗 MDA 含量显著低于对照。

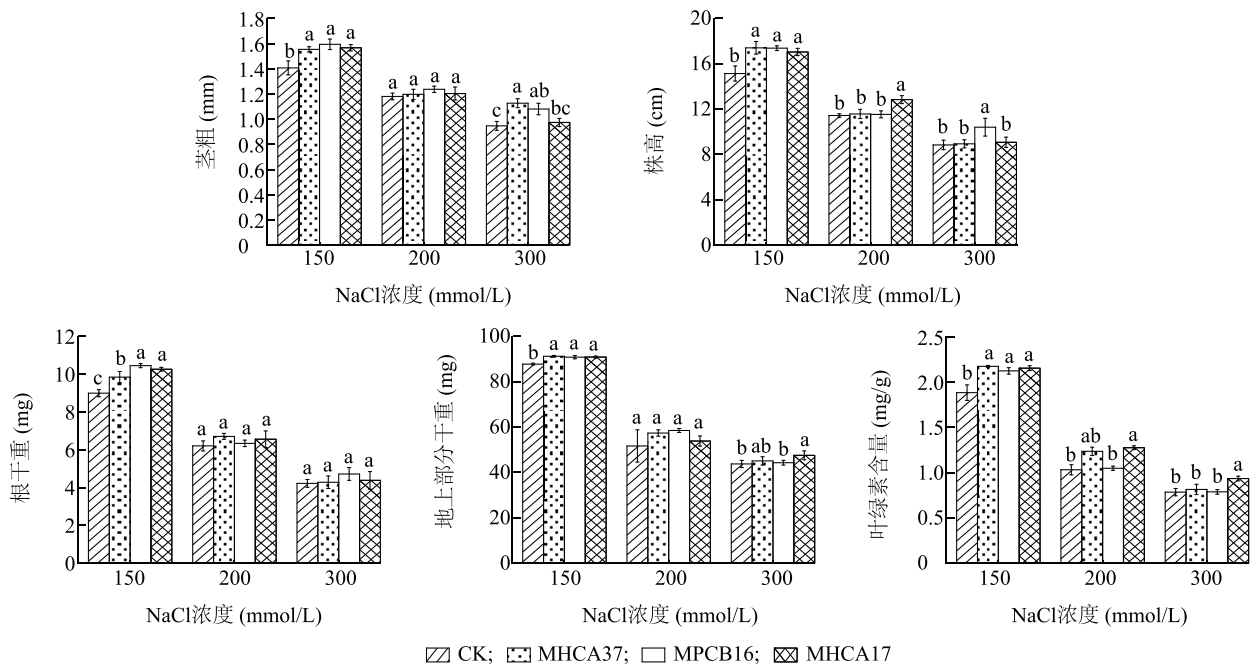


图 2 不同盐胁迫下产吲哚乙酸菌株对小麦的促生效果

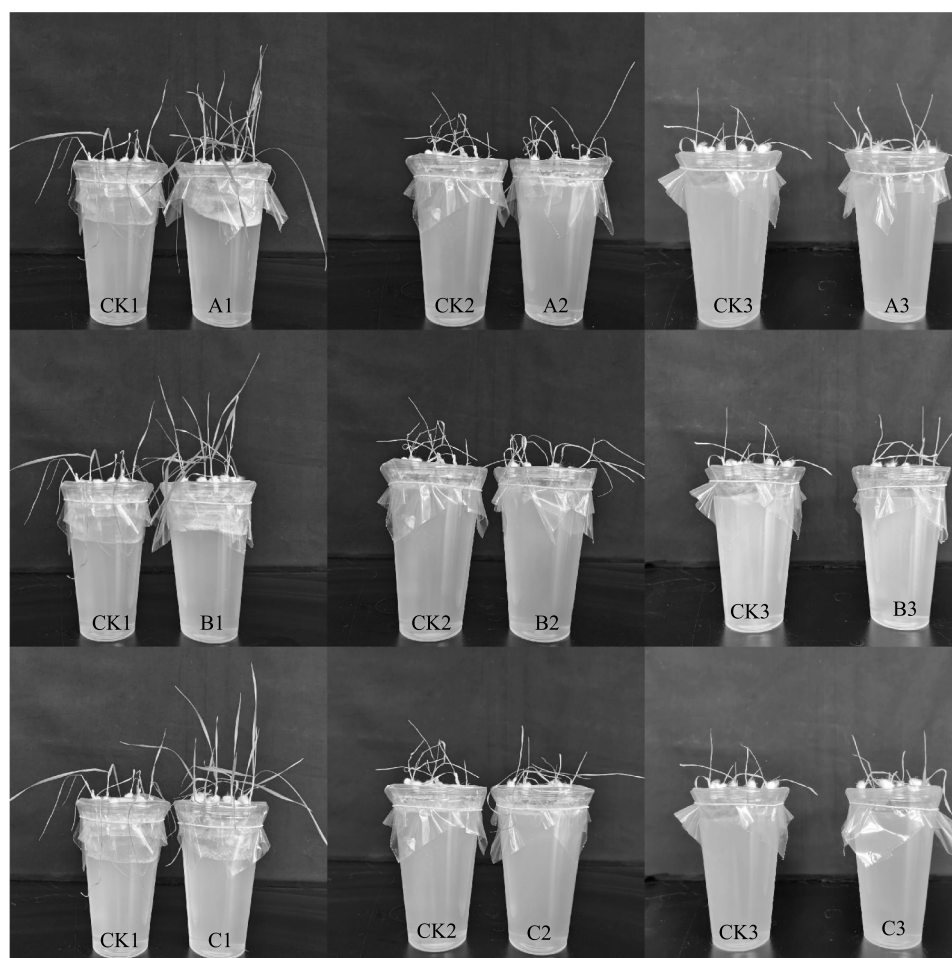
Fig.2 Growth-promoting effect of indole-3-acetic acid-producing strains on wheat under different salt stresses

3 讨论

植物促生菌 (PGPB) 菌株可促进土壤物质转化,增强土壤肥力,在提高植物抗逆性方面具有较好的应用前景^[22-28],但多数 PGPB 的生长环境偏中性,难以适应高盐环境,限制了其在盐碱地的广泛应用。新疆盐碱地分布广泛、含盐量高,高盐环境的长期驯化使其中的微生物具有较强的耐盐碱能力。本研究从新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州荒漠盐碱地上分离的耐盐菌株在 NaCl 含量为 2.5%~7.0% 时多数能够正常生长,有的菌株甚至在 NaCl 含量为 10.0% 的情况下仍然能够生长。韦廷舟等^[8]分离自盐矿区污染土壤的 *Bacillus mobilis* ST37 菌株能够耐受 4% NaCl 胁迫,克服了高盐环境下菌株难以存活的问题。本研究从盐生植物根际、根内、土壤中筛选的高产 IAA 的多功能菌株 MHCA37、MPCB16、MHCA17 除了具有一定的耐盐能力,还兼具多种促生性能。

不同的地理环境、宿主植物等导致具有产 IAA 能力的微生物的多样性,以肠杆菌属 (*Enterobacter*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、根瘤菌属 (*Rhizobium*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 等占主要优势^[29]。如龚诚君等^[30]分离自污染土壤的产 IAA 且抗 Ni、Cd 的菌株 N4 与董蒙蒙等^[31]分离自南方红豆杉 (*Taxus walli-*

chiana) 的高产 IAA 内生菌 KLBMPCTC10 均属于芽孢杆菌属;从蔬菜根际分离的高产 IAA 的菌株 FX-02,被鉴定为霍氏肠杆菌^[32];杜佳慧等^[33]从多花黄精内生菌中分离的高产 IAA 菌株分属于芽孢杆菌属和葡萄球菌属 (*Staphylococcus*)。本研究从盐碱地及植物中筛选的产 IAA 菌株同样以肠杆菌属为主,且 IAA 产量更高,该结果证实了肠杆菌属普遍存在于植物根系和根际,且能对根际土壤产生积极影响。但也有研究发现,肠杆菌属中一些菌株可能对农作物造成枯萎、烂根等副作用^[34-35],因此其作为植物促生菌的实际应用还需进行深入研究。鞘氨醇属菌株在提高植物抗逆性和促进植物生长发育等方面也有着积极影响。如 Khan 等^[36]研究发现, *Sphingomonas* sp. LK11 可在高浓度盐胁迫 (500 mmol/L) 下存活,显著促进植物生长,提高植物耐盐性;李兴杰^[37]从土壤中分离得到的鞘氨醇单胞菌 CX-15 具有耐镉特性,能够促进植物生长发育,改良并修复被镉污染的土壤。本研究分离的鞘脂菌属菌株 MPCB16 产 IAA 量达 31.8 mg/L,略低于陈越等^[29]分离自烟草根际土壤的鞘氨醇属菌株 m-53,但在本研究中 MPCB16 对小麦的促生效果很好。有关埃希氏菌作为促生菌的报道相对较少,但也有学者指出其耐盐性强且兼具活化镉能力,具有一定



CK1:对照 1(150 mmol/L NaCl 处理未接种产 IAA 菌株的小麦幼苗);CK2:对照 2(200 mmol/L NaCl 处理未接种产 IAA 菌株的小麦幼苗);CK3:对照 3(300 mmol/L NaCl 处理未接种产 IAA 菌株的小麦幼苗);A1:150 mmol/L NaCl 处理接种了 MHCA37 菌株的小麦幼苗;A2:200 mmol/L NaCl 处理接种了 MHCA37 菌株的小麦幼苗;A3:300 mmol/L NaCl 处理接种了 MHCA37 菌株的小麦幼苗;B1:150 mmol/L NaCl 处理接种了 MPCB16 菌株的小麦幼苗;B2:200 mmol/L NaCl 处理接种了 MPCB16 菌株的小麦幼苗;B3:300 mmol/L NaCl 处理接种了 MPCB16 菌株的小麦幼苗;C1:150 mmol/L NaCl 处理接种了 MHCA17 菌株的小麦幼苗;C2:200 mmol/L NaCl 处理接种了 MHCA17 菌株的小麦幼苗;C3:300 mmol/L NaCl 处理接种了 MHCA17 菌株的小麦幼苗。

图 3 不同盐胁迫下产吲哚乙酸菌株对小麦植株的影响

Fig.3 Effects of indole-3-acetic acid-producing strains on wheat plants under different salt stresses

的改良盐碱土壤和修复重金属污染土壤的潜力。总体上看,本研究分离得到的产 IAA 菌株多样性并不突出,这可能是新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州贫瘠的土质、长期盐碱干旱的条件及盐生植物独特的根际微生态环境综合作用的结果。

外源施加适宜浓度的 IAA 能够刺激植物细胞分裂和伸长,诱导植物不定根形成^[38-39]。本研究中接种了 MHCA37、MPCB16、MHCA17 菌株的小麦在应对盐胁迫试验中取得了积极效果,这与陈越等^[29]在烟草上的研究结果相似,与 Walpola 等^[40]和 Husen^[41]的研

究结果存在一定差距,后期需优化菌株的培养条件使 IAA 产量最大化,更好地发挥其促生潜能。本研究中耐盐促生试验的验证条件为不同浓度的 NaCl,这些功能菌株可能仅对氯化物型盐碱土发挥作用,对其他类型盐碱土(如苏打型盐碱土、硫酸盐型盐碱土)的改良效果还需针对性地进行试验和分析。PGPB 与植物的互动关系往往不稳定,为进一步拓展对生长素生理功能的认识,后期将丰富接种的宿主种类,并分析不同发育时期植物体内 IAA 含量变化,深入探索产 IAA 促生菌对植物的调控机制。本研究发现,随着

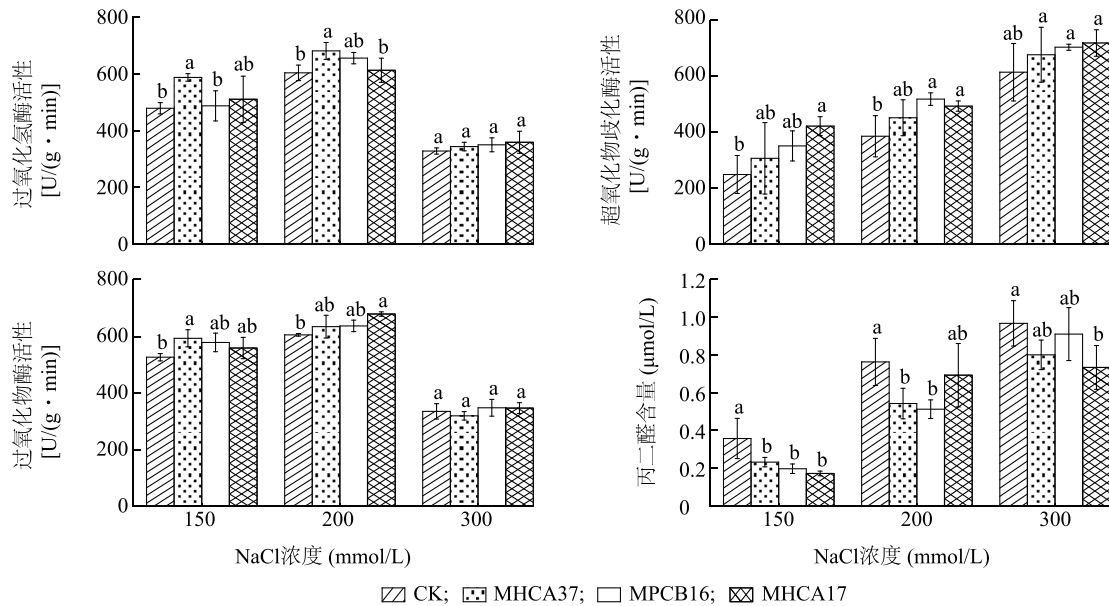


图 4 不同盐胁迫下分泌吲哚乙酸菌株对小麦生理特性的影响

Fig.4 Effects of indole-3-acetic acid-secreting strains on physiological characteristics of wheat under different salt stresses

NaCl 浓度升高,小麦叶片 *POD*、*CAT* 活性呈先升高后下降的趋势,尤其是当盐浓度达到 300 mmol/L 时,酶活性明显减弱,推测可能是由于高盐胁迫使菌株生长受限,削弱了其对植物的促生能力。当前研究仅采用半固体培养基,最大限度排除了土壤微环境中其他因素的干扰,能更有针对性地考察产 IAA 菌株的促生效果,但这些菌株在实际野外环境及其他宿主植物中是否仍能发挥促生作用,以及外源施加的 IAA 浓度是否存在一个合适的区间范围仍需进一步研究。

目前报道的产 IAA 菌株多数功能较单一,适应性不强,而将具有不同促生特性且无拮抗的菌种制备成复合菌剂共同接种能起到互补或增效的作用^[42]。如将两株解磷菌 PSB-1、HZP1 与根瘤菌混合接种,能显著促进大豆和紫云英的生长^[43];将具有解钾、溶磷、产 IAA 能力的耐盐菌株 C8 和具有溶有机磷、产 IAA 功能的耐盐碱菌株 B4 混合培养后,其解钾、溶磷及产 IAA 能力显著高于单一菌株,更能促进盐胁迫下植株生长^[44]。因此,广泛分离筛选耐盐碱的植物促生菌,将几个具有单一功能的纯菌株复配制成多功能的复合菌剂是促进植物生长、改良盐碱土壤的理想措施。但混合菌株发酵体系的构建相对复杂,除考虑体系内不同菌株间的相互作用外,培养基组分及发酵条件也是影响菌体生长的关键因素^[45]。以后将基于菌株的不同促生潜能,构建

合成菌群,探究混合发酵对菌株活性的影响,并探索其协同作用机制,力求达到植物促生和盐碱土壤改良的双重效果,为在盐渍化土壤改良中发挥更大的作用提供依据。

4 结论

本研究从新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州荒漠盐碱植物根际、根内、土壤中共筛选出 181 株产 IAA 菌株,所有菌株归属于 6 个属,分泌 IAA 量介于 9.7 mg/L 至 38.9 mg/L 之间,其中 MHCA37、MPCB16 和 MHCA17 的 IAA 分泌量分别是 38.9 mg/L、31.8 mg/L 和 30.0 mg/L,且 MHCA37 菌株兼具固氮、溶有机磷性能, MPCB16 兼具固氮、产 ACC 脱氨酶、产铁载体、溶无机磷性能, MHCA17 兼具产 ACC 脱氨酶、产铁载体、溶有机磷和无机磷等性能。在 150 mmol/L NaCl 胁迫下,接种 MHCA37、MPCB16 和 MHCA17 菌株的小麦在茎粗、株高、根干重、地上部分干重、叶绿素含量 5 个方面均显著高于对照;接种 MHCA37 菌株后小麦幼苗 *CAT* 活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA17 菌株的小麦 *SOD* 活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 和 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA37 菌株后小麦幼苗 *POD* 活性在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 时显著高于对照,接种 MPCB16 菌株的小麦

幼苗 *SOD* 活性在 NaCl 浓度为 200 mmol/L 时显著高于对照;接种 MHCA37、MPCB16、MHCA17 菌株的小麦幼苗在 NaCl 浓度为 150 mmol/L 低浓度盐胁迫下 MDA 含量均显著低于对照。

参考文献:

- [1] 毛 恋, 芦建国, 江海燕. 植物响应盐碱胁迫的机制[J]. 分子植物育种, 2020, 18(10): 3441-3448.
- [2] 王慧楠, 唐琦勇, 顾美英, 等. 新疆盐碱地区盐爪爪内生菌群落组成与分布格局研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 257-266.
- [3] 杜良宗, 孙三民, 谭 昆, 等. 新疆土壤盐碱地形成的原因及改良措施[J]. 种子科技, 2021, 39(3): 59-60.
- [4] PANKAJ U, SINGH D N, MISHRA P, et al. Autochthonous halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria promote bacoside A yield of *Bacopa monnieri* (L.) Nash and phytoextraction of salt-affected soil[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(5): 671-683.
- [5] 霍佳慧, 毕少杰, 于欣卉, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. 现代农业科技, 2022(9): 90-96.
- [6] LU Y D, XU J. Phytohormones in microalgae: a new opportunity for microalgal biotechnology[J]. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(5): 273-282.
- [7] 杨 平, 蔡芸菲, 孙 悦, 等. 生长素引发对盐胁迫下棉花生长发育及产量品质的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(20): 6851-6859.
- [8] 韦廷舟, 文 怡, 王 超, 等. 一株产 IAA 芽孢杆菌 ST37 对油菜的耐盐促生作用[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 210-215.
- [9] LI H S, LEI P, PANG X, et al. Enhanced tolerance to salt stress in canola (*Brassica napus* L.) seedlings inoculated with the halotolerant *Enterobacter cloacae* HSNJ4[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 26-34.
- [10] 李 静, 李明源, 张 甜, 等. 盐生植物解磷菌的筛选及促生效应研究[J]. 核农学报, 2023, 37(7): 1470-1479.
- [11] 柴加丽, 姚 拓. 高寒草甸多枝黄耆根际促生菌特性研究与鉴定[J]. 中国草地学报, 2022, 44(10): 68-74.
- [12] 雷海英, 赵青松, 杨 潇, 等. 苦参根际高效固氮菌的分离及复合菌肥对幼苗的促生效应[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 157-166.
- [13] 许佳露, 张 平, 李美芳, 等. 产铁载体菌株的分离、培养条件优化及初步应用[J]. 微生物学通报, 2022, 49(3): 1004-1016.
- [14] 漫 静, 唐 波, 邓 波, 等. 羊草根际促生菌的分离筛选及促生作用研究[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 59-71.
- [15] PENROSE D M, GLICK B R. Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria[J]. *Physiol Plant*, 2003, 118(1): 10-15.
- [16] 张慧敏. 产吡啶乙酸芽孢杆菌的筛选及其促进植物生长的效果研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [17] 韩 笑. 根际促生菌的筛选及其促进水稻在盐碱胁迫下生长的作用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [18] 孟丽媛, 邱 涵, 谢 瑾, 等. 解磷菌、解钾菌和固氮菌的分离筛选与鉴定[J]. 生物灾害科学, 2022, 45(2): 241-246.
- [19] 徐 亚, 范会芬, 赵珂玲, 等. 考马斯亮蓝法测定大豆水溶性蛋白提取方法的优化[J]. 大豆科学, 2022, 41(2): 196-202.
- [20] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 等. 分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J]. 草业科学, 2018, 35(8): 1965-1974.
- [21] 刘军民, 潘倍莎. 土壤水分胁迫对不同茬次紫花苜蓿丙二醛及抗氧化酶含量的影响[J]. 工业微生物, 2023, 53(5): 172-178.
- [22] 李章雷, 刘 爽, 王艳宇, 等. 5 株耐盐碱促生细菌的筛选鉴定及其对红小豆的促生作用[J]. 微生物学通报, 2021, 48(5): 1580-1592.
- [23] 李福艳, 刘晓玉, 颜静婷, 等. 三株产吡啶乙酸根际促生芽孢杆菌的筛选鉴定及其促生作用[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(5): 873-884.
- [24] 杜东霞, 李咏梅, 喻孟元, 等. 耐镉根际促生菌 WYN5 的分子鉴定及其对黑麦草富集镉的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(27): 59-66.
- [25] 张 婷, 游小英. 产铁载体的根际促生菌鉴定及其对月季生长和养分吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(4): 174-181.
- [26] 张 蛟, 龙锡恩, 崔士友, 等. 盐逆境下促生菌对水稻生长、产量及稻米品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 69-75.
- [27] 罗 娅, 况 刚, 张 萌, 等. 接种根际促生菌对白花前胡根际土壤微生态环境的影响[J]. 南方农业学报, 2024, 55(1): 75-85.
- [28] 陈多非, 徐 畅, 刘文佳, 等. 3 株水稻根际促生菌的筛选鉴定及促生作用研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(24): 196-202.
- [29] 陈 越, 李虎林, 朱诗苗, 等. 产吡啶乙酸(IAA)促生菌的分离鉴定及对烟草种子萌发和幼苗生长发育的影响[J]. 作物杂志, 2020, 36(2): 176-181.
- [30] 龚诚君, 周昕霏, 杨 朕, 等. 产 IAA 菌与生物炭对镍和镉复合污染土壤的修复[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(5): 140-147.
- [31] 董蒙蒙, 袁 博, 徐玲霞, 等. 南方红豆杉产 IAA 内生芽孢杆菌的分离、鉴定及产脂肽类化合物研究[J]. 亚热带植物科学, 2020, 49(6): 420-426.
- [32] 徐科玉. 高产吡啶乙酸微生物菌株的筛选、发酵及其促生效果[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2022.
- [33] 杜佳慧, 徐伟芳, 杨晓冬, 等. 多花黄精产吡啶乙酸内生菌的分离筛选及其对黄精种子萌发的影响[J]. 生物技术通报, 2022, 38(12): 223-232.
- [34] 林国钦, 张 婷, 左 杰, 等. 产 IAA 根内生菌的分离鉴定及对小麦促生效果[J]. 福建农业科技, 2022, 53(4): 10-17.
- [35] JEEVAN U, KURIAN P S, SREELATHA U, et al. Morphological, symptomatological and molecular characterization of *Enterobacter cloacae* causing bacterial wilt in African marigold (*Tagetes erecta* L.) [J]. *Indian Phytopathology*, 2022, 75(1): 279-285.
- [36] KHAN A L, WAQAS M, ASAF S, et al. Plant growth-promoting endophyte *Sphingomonas* sp. LK11 alleviates salinity stress in *Solanum pimpinellifolium* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 133: 58-69.
- [37] 李兴杰. 耐镉植物促生菌的分离、鉴定及其对镉吸附效应与机

- 理研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [38] SOUZA-MAYARA S T, BAURA-VALTER A, SANTOS-SANDRA A, et al. *Azospirillum* spp. from native forage grasses in Brazilian Pantanal floodplain: biodiversity and plant growth promotion potential[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2017, 33(4): 1-13.
- [39] SUN S L, YANG W L, FANG W W, et al. The plant growth-promoting rhizobacterium *Variovorax boronicumulans* CGMCC 4969 regulates the level of indole-3-acetic acid synthesized from indole-3-acetonitrile[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84(16): e00298-18.
- [40] WALPOLA B C, NOH J G, KIM C K, et al. Optimization of indole-3-acetic production by phosphate solubilization bacteria isolated from waste mushroom bed of *agaricus bisporus*[J]. Journal of Mushroom, 2013, 11(2): 53-62.
- [41] HUSEN E. Screening of soil bacteria for plant growth promotion activities *in vitro* [J]. Indonesian Journal of Agricultural Science, 2016, 4(1): 27-31.
- [42] MAHREEN Y, EJAZ I, MARIA R, et al. Differential root exudation and architecture for improved growth of wheat mediated by phosphate solubilizing bacteria [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 744094.
- [43] 胡 倡, 李慧明, 伍 惠, 等. 解磷菌和根瘤菌复合接种对大豆和紫云英共生固氮的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 38-45.
- [44] 车永梅, 刘广超, 郭艳苹, 等. 一种耐盐复合菌剂的制备和促生作用研究[J]. 生物技术通报, 2023, 39(11): 217-225.
- [45] 周 静, 黄文茂, 秦利军, 等. 四株 PGPR 菌株混菌发酵体系的构建及促生效应评价[J]. 生物技术通报, 2021, 37(4): 116-126.

(责任编辑:黄克玲)