

耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

刘鹏, 毕江涛, 罗成科, 惠治兵, 李文兵, 肖国举, 王静

引用本文:

刘鹏, 毕江涛, 罗成科, 等. 耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 246–256.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0590>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

屎肠球菌胞外多糖对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

罗晟, 赵泽文, 任新宇, 魏宏宇, 马雅静, 潘起涛, 李荣同, 龚国胜, 程新
农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1888–1899 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0181>

铊对蚕豆幼苗光合特性和呼吸代谢的毒害机理

刘泽伟, 赖金龙, 李俊柯, 丁峰, 张宇, 罗学刚
农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1916–1924 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0390>

Pb、Cd和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响

陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 张韵, 侯晓龙, 蔡丽平, 周垂帆
农业环境科学学报. 2018, 37(4): 647–655 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1510>

Delftia sp.B9对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗镉积累的影响

刘玉玲, 彭鸥, 铁柏清, 刘亦婷, 罗海艳, 李丹阳, 刘寿涛
农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1855–1863 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0261>

镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响

王丙烁, 黄益宗, 李娟, 龙健, 王农, 黄永春
农业环境科学学报. 2019, 38(4): 746–755 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0770>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘鹏, 毕江涛, 罗成科, 等. 耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 246–256.

LIU P, BI J T, LUO C K, et al. Effects of salt-tolerant bacteria on rice seed germination and seedling growth under salt stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(2): 246–256.



开放科学 OSID

耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响

刘鹏¹, 毕江涛^{2*}, 罗成科¹, 惠治兵¹, 李文兵¹, 肖国举², 王静²

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021)

摘 要:土壤盐渍化严重影响植物生长发育,为探讨微生物对盐胁迫下植物种子萌发及幼苗生长的调控作用,以宁粳28号水稻种子为材料,采用培养皿滤纸萌发的方法研究不同耐盐菌株组合对150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫下与水稻种子萌发及幼苗生长相关的生理代谢的影响。结果表明:不同菌株组合对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长均有一定的促进作用。与盐胁迫下不加菌的对照处理相比,枯草芽孢杆菌+苏云金芽孢杆菌+阿氏芽孢杆菌(ABD)和枯草芽孢杆菌+苏云金芽孢杆菌+多黏类芽孢杆菌+阿氏芽孢杆菌(ABCD)菌株组合可使发芽率提高约20%,ABCD组合使水稻芽长和根长分别提高4.75倍和0.72倍,种子活力指数提高3.19倍,幼苗耐盐指数提高3.20倍,叶绿素含量与根系活力均显著增加($P<0.05$),相对盐害率显著下降($P<0.05$)。菌株组合不同程度地降低了盐胁迫下水稻幼苗丙二醛(MDA)含量,提高了过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)及超氧化物歧化酶(SOD)活性,可缓解盐分对水稻造成的毒害,但各处理之间存在一定的差异,其中多菌株复配能较好地提高幼苗SOD活性。研究表明,耐盐微生物能够增强水稻耐盐性,促进水稻种子萌发及幼苗生长,多菌株复配效果优于单菌株。

关键词:盐胁迫;外源微生物;水稻;种子萌发;幼苗生长;抗氧化酶活性

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)02-0246-11 doi:10.11654/jaes.2021-0590

Effects of salt-tolerant bacteria on rice seed germination and seedling growth under salt stress

LIU Peng¹, BI Jiangtao^{2*}, LUO Chengke¹, HUI Zhibing¹, LI Wenbing¹, XIAO Guojun², WANG Jing²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil salinization seriously affects plant growth and development. To explore the effects of microorganisms on seed germination and seedling growth under salt stress, filter paper germination of Ningjing 28 seeds in a petri dish under 150 mmol·L⁻¹ NaCl stress was conducted to study the effects of different salt-tolerant strain combinations on seed germination and seedling growth according to the physiological metabolism of rice. The results showed that different strain combinations promoted rice seed germination and seedling growth under salt stress. Taking no bacteria under salt stress as the control, the combinations of *Bacillus subtilis* + *Bacillus thuringiensis* + *Bacillus aryabhattai* (ABD) and *Bacillus subtilis* + *Bacillus thuringiensis* + *Paenibacillus polymyxa* + *Bacillus aryabhattai* (ABCD) could increase the germination rate by approximately 20%. The ABCD combination increased the bud length and root length by 4.75 times and 0.72 times, respectively, seed vigor index by 3.19 times, and salt tolerance index by 3.20 times. The chlorophyll content and root vigor also significantly increased ($P<0.05$), whereas the relative salt injury rate significantly decreased ($P<0.05$). The combination of strains reduced the content of malondialdehyde (MDA), increased the activities of peroxidase (POD), catalase (CAT), and superoxide dismutase (SOD) in rice seedlings under salt stress, and alleviated the salt toxicity to rice. There were some differences among the treatments, and the combination of multiple strains could improve the activity of SOD in rice seedlings. Salt-tolerant microorganisms can enhance the salt tolerance and promote the seed germination and seedling growth of rice. Moreover, the effect of multiple strains is better than that of a single strain.

Keywords: salt stress; exogenous microorganisms; rice; seed germination; seedling growth; antioxidant enzyme activity

收稿日期:2021-05-19 录用日期:2021-09-15

作者简介:刘鹏(1995—),男,宁夏中卫人,硕士研究生,从事环境微生物资源利用研究。E-mail:862577564@qq.com

*通信作者:毕江涛 E-mail:bi_jt@nxu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2016YFC0501302-2)

Project supported: The National Key Research and Development Program Sub-Projects(2016YFC0501302-2)

我国存在大面积盐渍土,其主要分布在东北、华北、西北内陆和长江以北沿海地区,是我国农业生产发展的主要障碍之一^[1]。土壤盐渍化一方面造成土壤板结与肥力下降,阻碍植物吸收养分^[2];另一方面通过渗透和离子胁迫影响植物和细胞水平的生理过程^[3],使种子萌发受阻^[4],叶绿素含量降低,光合作用下降^[5-6],根系活力降低^[7],能量消耗增加,从而加速植物衰老,并最终导致枯萎或死亡^[8]。当植物受到盐分胁迫时,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等保护酶将参与控制活性氧的含量,在提高植物耐盐性中发挥着重要作用^[9]。

水稻(*Oryza sativa*)是宁夏的优势作物,年均种植面积8万hm²,总产量约6亿kg,该区是全国优质粳稻的最佳生产区之一^[10],北部引黄灌区土地平整、水资源便利、适合水稻大面积种植^[11],但该地区降水量少、气候干旱、地下水位高、蒸发作用强烈,存在不同程度的盐渍化^[12]。因此,通过生物学措施提高水稻耐盐性,增加盐碱地水稻产量,对盐碱地开发利用具有重要意义。

土壤是巨大的微生物储存库,大量有益微生物能定植于植物根部,通过调节植物体内激素变化^[13]、诱导植物产生抗活性氧酶、促进植物中渗透保护物质增加、产生胞外多糖、调控植物体内离子平衡、诱导光合速率变化等过程提高作物耐盐性^[14]。目前,对添加外源物质提高作物抗逆性的研究已有很多,利用微生物促进种子萌发、幼苗生长和提高作物抗逆性越来越受到重视。黄瓜^[15]、紫花苜蓿^[16]、黑麦草^[17]、烟草^[18]、小麦^[19]等作物在盐胁迫下通过添加耐盐微生物提高作物耐盐性的研究较多,但在盐碱环境条件下对水稻生长发育的影响研究相对不足,且缺乏系统性。

种子萌发期是水稻在盐胁迫环境条件下生长发育过程中最脆弱的阶段^[20],萌发期的生长状况对水稻后期的生长发育及产量至关重要。因此,本研究开展不同菌株组合对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响,通过测定叶绿素、根系活力和酶活性等,筛选

出促进盐胁迫下水稻幼苗生长最佳的菌株组合,初步阐述微生物诱导水稻的抗盐机理,以期为生物修复改良盐碱地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为宁粳28号,品种审定编号为宁审稻2003004,购自宁夏回族自治区原种场。

供试菌株:4株耐盐菌由课题组分离自宁夏盐碱土,各菌株耐盐均可达100 g·L⁻¹左右,且菌株之间无拮抗作用,菌株纯化保存于宁夏大学生态环境学院环境微生物实验室,菌株名称和来源见表1。

1.2 试验方法

1.2.1 菌悬液制备

菌株活化后,各取2环分别接种于LB液体培养基中,30℃、180 r·min⁻¹振荡培养24 h。将培养液分装于无菌离心管中,室温条件下6 000 r·min⁻¹离心15 min,收集菌体。张治振等^[21]的研究结果显示,150 mmol·L⁻¹ NaCl可使15个品种的水稻生长受到抑制,故使用150 mmol·L⁻¹的无菌NaCl溶液洗涤菌体3次并调配成菌悬液,使吸光度OD_{600nm}=1.0。

1.2.2 水稻种子处理

选取适量籽粒饱满、颗粒大小相当的种子,蒸馏水清洗表面灰尘,先用10%的NaClO溶液浸泡10 min后用无菌去离子水清洗5~8次,再用75%酒精浸泡5 min,最后用无菌去离子水淋洗5~7次,消毒后的水稻种子在无菌去离子水中室温浸泡24 h,备用。

1.2.3 试验设计

将铺有2层滤纸的90 mm的玻璃培养皿在高压蒸汽灭菌锅中121℃灭菌30 min,待培养皿冷却后,取30粒种子均匀摆放在培养皿中,加入10 mL菌悬液后,将培养皿放入28℃的光照恒温培育箱。试验共设置17个处理(表2),每个处理重复9次。T1为阳性对照处理,用无菌去离子水代替菌悬液;T2~T16为试验处理,各培养皿均加入10 mL菌悬液,将各菌悬液

表1 供试菌株及其来源

Table 1 Test strains and sources

菌株编号 Strain number	GenBank 登录号 GenBank ID	菌株名称 Strain name	菌株来源 Strain source	经纬度 Latitude and longitude
A	MW704114	枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	贺兰县红星村重度盐碱地	106.44°E, 38.58°N
B	MW704115	苏云金芽孢杆菌 <i>Bacillus thuringiensis</i>	惠农区燕子墩盐碱地苜蓿根际	106.57°E, 39.10°N
C	MW704116	多黏类芽孢杆菌 <i>Paenibacillus polymyxa</i>	惠农区燕子墩盐碱地苜蓿根际	106.57°E, 39.10°N
D	MW803060	阿氏芽孢杆菌 <i>Bacillus aryabhattai</i>	惠农区燕子墩盐荒地	106.55°E, 39.07°N

表2 菌株组合设置

Table 2 Strain combination settings

处理 Treatment	菌株组合 Strain combination	处理 Treatment	菌株组合 Strain combination	处理 Treatment	菌株组合 Strain combination
T1	无菌水	T7	AC	T13	ABD
T2	A	T8	AD	T14	ACD
T3	B	T9	BC	T15	BCD
T4	C	T10	BD	T16	ABCD
T5	D	T11	CD	T17	150 mmol·L ⁻¹ 的 NaCl 溶液
T6	AB	T12	ABC		

等比例混合作为组合处理液;T17为阴性对照处理,用150 mmol·L⁻¹的NaCl溶液代替菌悬液。培养期间每2 d更换一次处理液,以保证胁迫环境不变。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标的测定

培养期间每日记录水稻种子萌发数量,以芽长达到种子长度的1/2为发芽标准,观察记录种子的萌发情况,第4 d统计发芽势,第8 d统计发芽率并测定水稻幼苗的根长、芽长,计算发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、耐盐指数和相对盐害率。

种子发芽势=4 d内发芽种子数/供试种子数

种子发芽率=8 d内发芽种子数/供试种子数

种子发芽指数 $GI = \sum (Gt/Dt)$

式中:Gt为t天的发芽数;Dt为发芽日数。

活力指数 $VI = GI \times \text{平均幼苗长度}$

幼苗长度=根长+芽长

耐盐指数= $V_{i\text{盐}}/V_{i\text{水}} \times 100$

式中:Vi_盐为盐胁迫下的萌发活力指数;Vi_水为阳性对照下的萌发活力指数。

相对盐害率=(对照发芽率-处理发芽率)/清水处理发芽率×100%

1.3.2 生理指标的测定

叶绿素含量采用95%乙醇浸提-分光光度法测定:称取新鲜水稻幼芽0.2 g,剪碎放入研钵,加少量石英砂和碳酸钙及3 mL 95%乙醇研磨成匀浆,再加5 mL 95%乙醇研磨至组织变白,室温静置3~5 min后转移到10 mL离心管中4 000 r·min⁻¹离心5 min,取上清液,用95%乙醇定容至25 mL后在波长665 nm和649 nm下比色,通过吸光值分别计算叶绿素a(C_a)和叶绿素b(C_b)的浓度(mg·L⁻¹),二者之和即为叶绿素总浓度(mg·L⁻¹)。

$C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649}$

$C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665}$

根系活力采用乙酸乙酯浸提-TTC还原法测定:称取根0.5 g,放入培养皿,加入0.4%氯化三苯基四氮唑(TTC)溶液和1/15 mol·L⁻¹磷酸缓冲液的等比例混合液10 mL,使根充分浸于溶液,37 ℃暗处恒温振荡培养1 h,加入2 mL 1 mol·L⁻¹ H₂SO₄终止反应。取出根并吸干溶液,加4 mL乙酸乙酯和少量石英砂研磨提取三苯基甲臜(TTF)。把多次提取液合并于试管中,用乙酸乙酯定容至10 mL,于485 nm下比色,利用吸光值和标准曲线,得出TTC的还原量。

$\text{TTC还原量}(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = X/(W_{\text{根}} \cdot t)$

式中:X为TTC样品吸光度在标准曲线中所查到的相对应的还原量,μg;W_根为根质量,g;t为反应时间,h。

丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定:将水稻幼芽洗净擦干,称取0.2 g放入研钵,加入2 mL 10%三氯乙酸(TCA)和少量石英砂,冰浴研磨至匀浆,再加8 mL TCA进一步研磨,将匀浆于4 000 r·min⁻¹离心10 min,取2 mL上清液,再加2 mL 0.6% TBA溶液,混匀,沸水浴中反应15 min,迅速冷却后离心。取上清液测定450、532、600 nm下的吸光值。

$\text{MDA含量}(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}) = [6.45(A_{532} - A_{600}) - 0.56A_{450}] V/W_{\text{植}}$

式中:V为提取液体积,mL;W_植为植物组织鲜质量,g。

抗氧化酶活性:取新鲜水稻幼芽0.5 g,采用液氮研磨法进行研磨,研磨后的样品置于0~4 ℃预冷的0.2 mol·L⁻¹、pH 7.0的磷酸缓冲液中浸提2 h,4 ℃下6 000 r·min⁻¹离心10 min,上清液可用于同时测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的混合酶液。采用氮蓝四唑(NBT)法测定SOD活性,以抑制NBT光化还原的50%为一个酶活单位(U);采用愈创木酚法测定POD活性,以1 min内A₄₇₀变化0.01为1个活性单位(U);采用紫外分光光度法测定CAT活性,以1 min内吸光值A₂₄₀减少0.1的酶量为1个酶活单位(U)。上述指标均参照《植

物生理学实验教程》^[22]完成,每个处理设3个重复。

1.4 数据处理

采用SPSS 26统计分析软件对各项指标进行单因素方差分析,采用Microsoft Excel 2010和Origin 2019软件整理数据和绘制图表。

2 结果与分析

2.1 添加耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发的影响

由表3可知,150 mmol·L⁻¹的NaCl胁迫对水稻种子萌发具有显著的抑制作用,而菌悬液的添加对盐胁迫下水稻种子萌发具有促进作用。盐胁迫下,水稻种子萌发受到抑制,其发芽势、发芽率和发芽指数均显著低于无胁迫处理($P<0.05$),种子发芽率低于50%,比无胁迫处理低36.30个百分点,发芽指数低12.08;添加不同菌悬液后,发芽势提高4.07~20.37个百分点,发芽率提高7.04~22.96个百分点,发芽指数提高2.34~9.18。不同菌株组合对种子萌发效果的影响存在差异,盐胁迫下T13水稻种子发芽势显著高于其他处理($P<0.05$);T13种子发芽率和发芽指数最高,其次为T16,但二者差异不显著($P>0.05$),发芽率可提高约20个百分点,发芽指数可提高8左右。

2.2 添加耐盐菌对盐胁迫下水稻种子生长的影响

2.2.1 对水稻根长和芽长的影响

由图1可知,150 mmol·L⁻¹的NaCl胁迫导致水稻

幼苗生长受到抑制,其根长和芽长显著短于无盐胁迫($P<0.05$)。耐盐菌悬液添加显著促进了幼苗根和芽的生长,T16是促进芽和根生长效果最好的菌株组合,其次为T13和T2,其中T16处理后的芽长是T17的5.7倍,说明4株菌协作能有效减轻盐分胁迫对水稻幼苗的毒害作用,促进幼苗生长。

2.2.2 对水稻种子活力指数的影响

与传统的发芽率相比,种子活力能反映种子在实际条件下的发芽速度和均匀性,以及幼苗的健壮生长潜力。由图2可知,150 mmol·L⁻¹的NaCl胁迫会显著降低种子活力($P<0.05$),T1种子活力指数是T17的6倍;微生物添加均能显著提高盐胁迫下种子活力($P<0.05$),T16效果最好,其次为T13,再次为T2,这三者之间差异显著($P<0.05$),分别较T17的种子活力指数提高了3.19倍、2.51倍和1.98倍;T5对提高种子活力影响最小,仅提高了0.38倍。

2.2.3 对水稻种子耐盐指数和相对盐害率的影响

耐盐指数反映了种子对盐碱胁迫的耐受程度,相对盐害率反映了种子在盐胁迫下的损伤程度。由表4可知,菌悬液添加显著提高盐胁迫下水稻种子的耐盐指数、降低相对盐害率($P<0.05$),其中T16水稻种子耐盐指数最高,其次为T13,T5的影响最小;T13相对盐害率最低,其次为T16,分别较T17降低了79.48%和71.79%,T13与T16二者差异不显著($P>0.05$)。

表3 不同菌株组合对盐胁迫下水稻种子萌发的影响

Table 3 Effects of different strain combinations on rice seed germination under salt stress

处理 Treatment	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index
T1	66.67±5.53a	85.93±7.22a	28.57±1.82a
T2	50.00±11.79b	59.26±7.41d	21.22±4.42cd
T3	43.70±4.84bc	61.48±8.84d	18.83±1.58de
T4	44.44±7.26bc	57.41±9.69de	19.54±2.95de
T5	47.04±11.60bc	59.63±9.49d	19.93±4.20cd
T6	47.41±6.41bc	59.63±5.12d	20.31±1.98cd
T7	50.37±9.04b	62.96±8.07cd	21.11±2.89cd
T8	51.11±13.12b	60.74±11.52d	21.64±4.47cd
T9	50.74±7.22b	62.96±9.35cd	21.79±2.72cd
T10	44.81±8.35bc	60.00±8.66d	20.00±3.57cd
T11	47.04±9.49bc	60.37±5.12d	20.07±2.48cd
T12	46.30±7.90bc	56.67±6.87de	19.68±3.16d
T13	60.00±7.99a	72.59±6.62b	25.67±2.76b
T14	43.70±7.54bc	57.41±7.60de	19.45±1.85de
T15	49.63±6.11b	60.37±7.16d	21.32±2.67cd
T16	51.11±7.99b	70.37±7.54bc	23.13±2.87bc
T17	39.63±7.16c	49.63±7.35e	16.49±2.99e

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a same column indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

2.3 添加耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗生理特性的影响

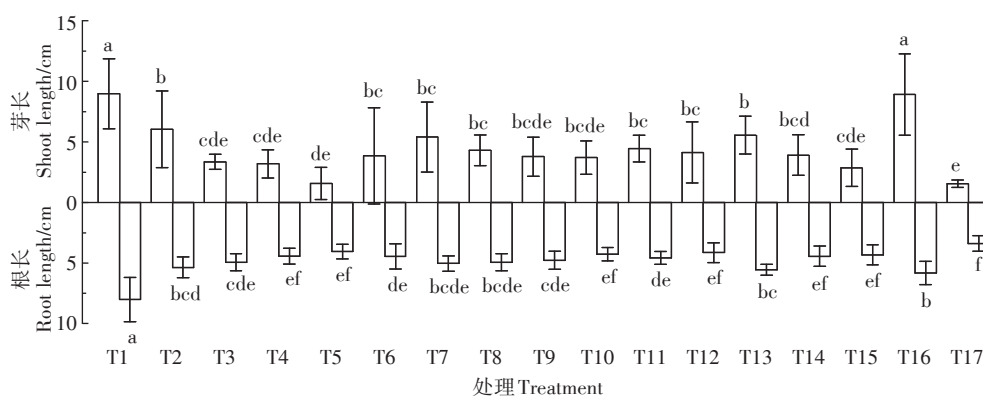
2.3.1 对水稻幼苗叶绿素含量的影响

由图3可知,在NaCl胁迫下,水稻幼苗茎叶中叶绿素含量显著降低($P<0.05$),多菌株组合菌悬液添加可提高叶绿素含量,且效果优于单菌株,其中T8效果最佳,其次为T16,叶绿素含量分别较T17增加了33.75%和31.90%,T8和T16二者差异不显著($P>$

0.05)。

2.3.2 对水稻幼苗根系活力的影响

由图4可知,NaCl胁迫导致水稻幼苗根系活力显著降低($P<0.05$),菌悬液添加可显著提高盐胁迫下水稻幼苗根系活力,但不同菌株组合对根系活力影响差异较大,其中T2影响最大,较T17提高12.47倍,与T1无显著差异($P>0.05$),其次为T16、T6和T5,T14影响



不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 耐盐菌对盐胁迫下水稻芽长和根长的影响

Figure 1 Effects of salt-tolerant bacteria on rice bud length and root length under salt stress

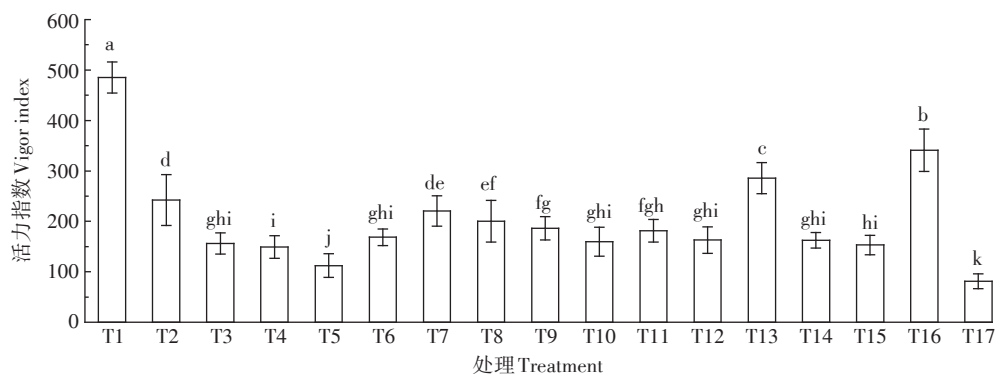


图2 不同菌株组合对盐胁迫下水稻种子活力指数的影响

Figure 2 Effects of different strain combinations on rice seed vigor index under salt stress

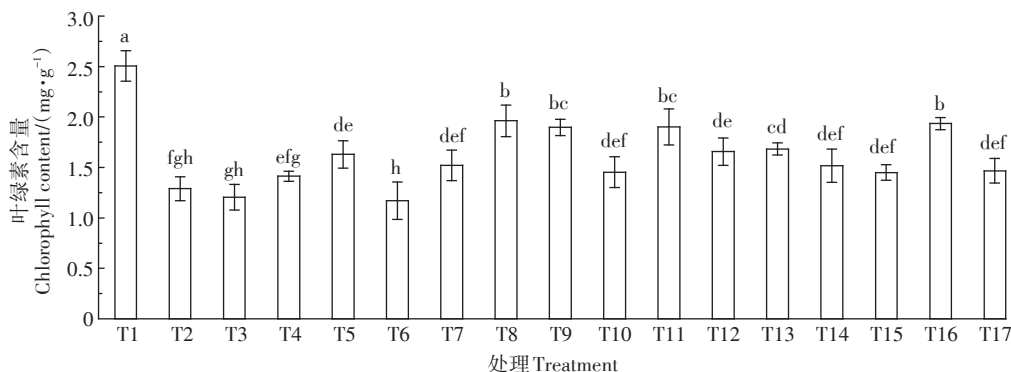


图3 耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗叶绿素含量的影响

Figure 3 Effects of salt-tolerant bacteria on the chlorophyll content of rice seedlings under salt stress

表4 不同菌株组合对盐胁迫下水稻种子耐盐指数和相对盐害率的影响

Table 4 Effects of different strain combinations on the salt tolerance index and relative salt damage rate of rice seeds under salt stress

处理 Treatment	耐盐指数 Salt tolerance index	相对盐害率 Relative salt damage rate/%
T1	100a	0e
T2	53.49d	24.53b
T3	34.48ghi	21.70b
T4	32.95i	26.89ab
T5	24.80j	24.06b
T6	37.20ghi	24.06b
T7	48.75de	19.81bc
T8	44.18ef	22.64b
T9	41.16fg	19.81bc
T10	35.26ghi	23.59b
T11	40.08fgh	23.11b
T12	35.96ghi	27.83ab
T13	63.06c	7.55de
T14	35.88ghi	26.89ab
T15	33.82hi	23.11b
T16	75.33b	10.38ed
T17	17.97k	36.79a

最小,较T17提高了1.37倍。

2.3.3 对水稻幼苗茎叶丙二醛含量及保护酶活性的影响

由图5可知,150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫致使水稻幼苗茎叶中MDA含量显著升高,比T1高49.25%,干扰了水稻的正常生命活动。加菌悬液后,叶片中MDA含量均有所降低,除T7、T12和T15外,其他处理均达到了显著水平($P<0.05$),其中,T16效果最佳,与T1无显著差异($P>0.05$),说明添加耐盐菌可以缓解盐胁迫

对水稻叶片膜脂过氧化伤害,且多菌株组合对盐胁迫的缓解作用更大。

由图6可知,150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫使水稻幼苗CAT活性降低,但与T1差异不显著。不同菌悬液添加对盐胁迫下水稻幼苗CAT活性影响不同,T2、T6使CAT含量显著降低($P<0.05$),T3、T4、T8、T9、T13、T16使CAT含量显著升高($P<0.05$),其中T13较T1提高了74.38%。

由图7可知,150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫能使水稻幼苗POD活性显著降低,添加菌悬液能够显著提高POD活性,但不同菌株组合对POD活性影响差异较大。T9较T17提高1.43倍,与T1无显著差异($P>0.05$),T5和T14使盐胁迫下水稻幼苗POD活性分别较T17降低了25.98%和31.94%。

由图8可知,150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫能使水稻幼苗SOD活性显著升高,除T5、T6和T9外,其他添加菌悬液处理均能够显著提高盐胁迫下水稻幼苗中SOD活性($P<0.05$),但不同组合对SOD活性影响差异较大,T11对盐胁迫下幼苗SOD活性影响最大,较T17可提高1倍以上。

3 讨论

3.1 耐盐菌对盐胁迫下水稻种子及幼苗的影响

植物能否在盐碱地上生长取决于其种子在盐分胁迫条件下能否萌发成苗^[23],当土壤中含盐量超过0.3%时,水稻发芽就会受到抑制,出现叶尖焦枯、老叶死亡等现象^[24]。随着NaCl浓度的升高,水稻种子发芽势、发芽率、萌发指数呈递减趋势^[25]。多项研究显示,盐胁迫条件下添加有益微生物可以有效降低盐胁迫、促进植物生长发育,枯草芽孢杆菌GB03菌液浸泡紫花苜蓿种子可以显著提高盐胁迫下发芽势与发

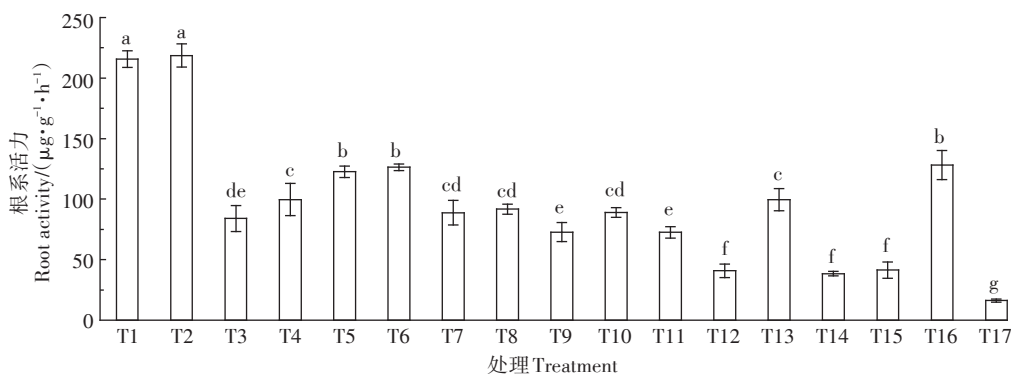


图4 耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗根系活力的影响

Figure 4 Effects of salt-tolerant bacteria on rice seedling root activity under salt stress

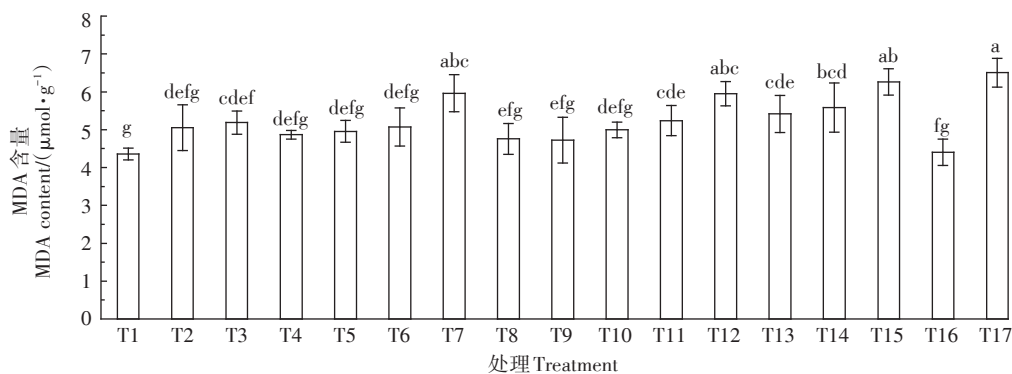


图5 耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗茎叶MDA含量的影响

Figure 5 Effects of salt-tolerant bacteria on MDA content of rice seedling stems and leaves under salt stress

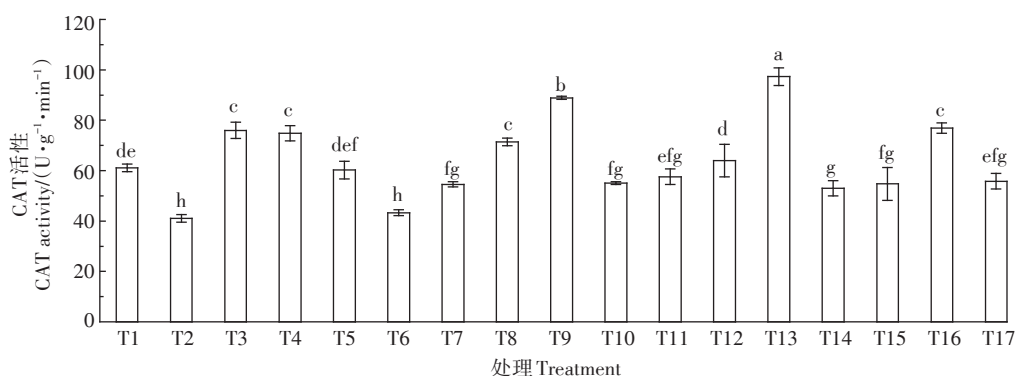


图6 耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗茎叶CAT活性的影响

Figure 6 Effects of salt-tolerant bacteria on CAT activity of rice seedling stems and leaves under salt stress

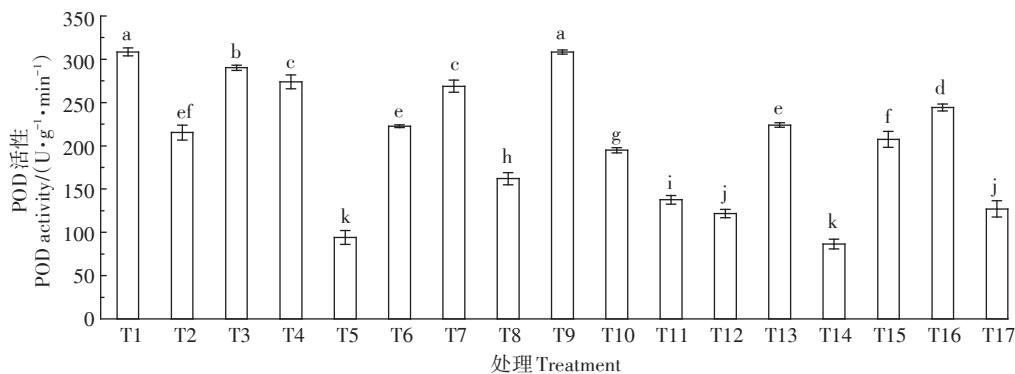


图7 耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗茎叶POD活性的影响

Figure 7 Effects of salt-tolerant bacteria on POD activity of rice seedling stems and leaves under salt stress

芽率,对株高和根长及生物量均有不同程度的提升作用,接种于土壤可直接或间接调节盐胁迫下白三叶草的叶片渗透势,细胞膜完整性和离子积累^[16,26]。Fan等^[27]从盐碱地植物根际分离出具有溶磷、产IAA等促生功能基因的节杆菌(*Arthrobacter*)和巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*),两菌株可以提高盐胁迫下番茄种子的发芽率、幼苗高度、活力指数以及植物的鲜质量和干质量。武珈亦等^[28]的研究结果显示,在0.3%

的NaCl胁迫下,荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)与巴西固氮螺菌(*Azospirillum brasilense*)菌液按1:1混合接入水稻根际,可显著提高水稻剑叶光合速率、生物量、分蘖能力、结实率和千粒质量。在本研究中,150 mmol·L⁻¹(质量分数约0.9%)的NaCl显著抑制了水稻种子萌发及幼苗生长,将枯草芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌及阿氏芽孢杆菌菌悬液单独或等比例混入盐溶液,各处理均能有效促进盐胁迫

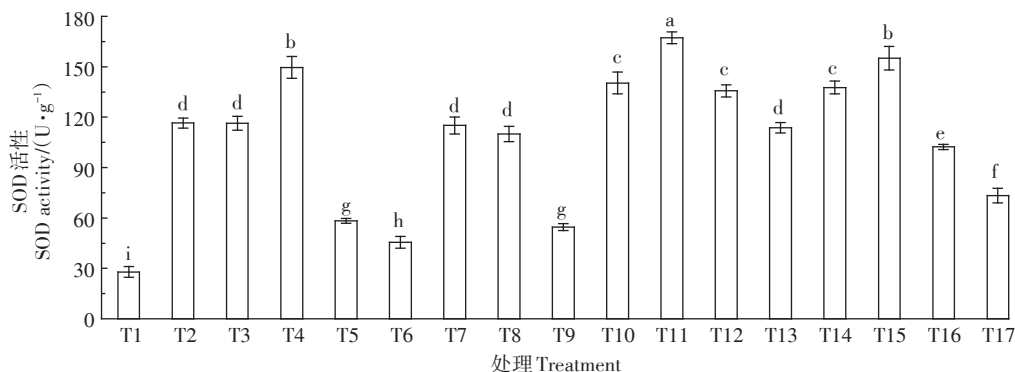


图8 耐盐菌对盐胁迫下水稻幼苗茎叶SOD活性的影响

Figure 8 Effects of salt-tolerant bacteria on SOD activity of rice seedling stems and leaves under salt stress

胁迫下水稻种子萌发、种子活力、耐盐指数、幼苗生物量,耐盐性有所增加,相对盐害率显著降低,另外,多菌株组合促生效果总体上优于单菌株,但菌株不同组合之间对盐胁迫下水稻促生效果存在差异,其原因有待进一步研究。

植物光合作用是受盐胁迫影响的生理过程之一^[29]。高等植物的色素主要是由叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素组成,光合色素含量减少是光合作用效率降低的一个主要原因^[30]。盐浓度越高、作用时间越长,对光合作用影响越大^[31]。韩庆庆等^[16,26]和武珈亦等^[28]接种菌株,在促进盐胁迫下植物生长的同时也增加了其叶绿素含量,提高了光合作用速率。本研究中,单菌株添加对盐胁迫下水稻叶绿素含量影响较小,但多菌株组合不同程度提高了盐胁迫下水稻幼苗叶绿素含量。

根系作为植物重要的吸收代谢器官,是植物在土壤盐渍化中最直接的受害部位,也是生长受抑制最早和最明显的部位^[32]。根系活力反映了根系的代谢能力,直接影响植物的生长和抗逆性^[33]。随着盐浓度的增长,水稻^[34]、罗布麻^[35]、小麦^[36]、番茄^[37]等作物的根系活力均受到抑制;添加荧光假单胞菌^[38]和枯草芽孢杆菌^[17]可以提高烟草和黑麦草根活力。本研究中,盐胁迫显著降低了水稻幼苗根系活力,加入菌悬液后根系活力显著提高,其中枯草芽孢杆菌效果最好,枯草芽孢杆菌自身合成的 α -淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶、纤维素酶等酶类和多种B族维生素可与植株体内的酶协同发挥作用,促进植物生长发育^[39],但在菌株复配后其效果有所降低,可能与菌株之间相互作用有关。对于盐胁迫条件下微生物参与提高水稻根系活力的机理还有待进一步研究。

高浓度盐会使植物细胞膜受到损伤,产生大量的

MDA,同时体内活性氧大量积累,SOD、CAT、POD是植物体内酶促防御系统的3个重要保护酶,这3种酶协同作用以控制植物体内自由基的含量,减轻细胞膜系统的损伤^[20,33]。在低浓度盐胁迫下,幼苗可通过提高保护酶活性减轻盐害,但这种能力不会随盐浓度增加而持续增强,当盐浓度过高时,保护酶活性就会降低^[40]。不同基因型的同种作物在盐胁迫下的酶活性变化也可能不同^[41]。80 mmol·L⁻¹盐胁迫下,水稻SOD、POD和CAT活性增强,MDA含量增加^[34]。本研究中,水稻种子在150 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫下,MDA含量和SOD活性显著上升,但POD活性显著下降,CAT活性无显著变化,这可能是盐浓度差异造成的。CHEN等^[42]的研究结果表明,解淀粉芽孢杆菌SQR9可能会通过总可溶性糖(TSS)含量增加而减轻对细胞的破坏,提高CAT和POD活性,降低Na⁺毒性,提高玉米耐盐性,促进玉米幼苗生长;韩冰等^[43]的研究结果显示,接种丛枝菌根真菌AMF可提高SOD、POD和CAT活性,降低MDA含量,缓解芦笋盐胁迫。本研究中各微生物处理与不加微生物处理相比,幼苗MDA含量均有所下降,大多处理的CAT、POD和SOD活性有不同程度提高,且多菌株混合在提高SOD活性中具有较好的效果。各菌株对酶活性影响具有一定的差异性,菌株复配后各处理间差异较大可能与菌株间的相互作用有关。

3.2 菌株在盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长中的作用

枯草芽孢杆菌和多黏类芽孢杆菌是兼具生防和促生功能的菌株^[44-45];苏云金芽孢杆菌常被用作杀虫剂^[46],阿氏芽孢杆菌是2009年分离出的新种,能够提高植物对金属离子、干旱、病害的抗性,二者均对植物具有一定的促生作用^[47-49]。本研究中枯草芽孢杆菌、

苏云金芽孢杆菌和阿氏芽孢杆菌3株菌组合提高了盐胁迫下种子发芽率、发芽指数和CAT活性,显著降低了盐胁迫下种子相对盐害率,效果优于4株菌组合,这在某种程度上说明复合菌种类数越多其效果不一定越好。枯草芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌和阿氏芽孢杆菌组合能显著提高种子活力指数、耐盐指数,促进幼苗和根系生长,显著降低盐胁迫下水稻幼苗MDA含量。苏云金芽孢杆菌在提高种子发芽率、发芽势和幼苗CAT活性方面效果优于多黏类芽孢杆菌,但提高SOD活性效果不如多黏类芽孢杆菌。枯草芽孢杆菌和阿氏芽孢杆菌在盐胁迫下种子萌发、幼苗生长、提高幼苗CAT活性和降低MDA含量方面具有较强的相似性,但在提高根系活力方面枯草芽孢杆菌效果更为突出,在提高幼苗SOD活性方面阿氏芽孢杆菌效果更优。菌株不同量、不同组合对盐胁迫下植物的促生效果不同,可根据植物生长需求对菌株进行配比。

4 结论

在150 mmol·L⁻¹ NaCl溶液中,耐盐芽孢杆菌可以显著提高水稻种子发芽率、增加幼苗叶绿素含量、提高根系活力和抗氧化酶活性,促进幼苗生长,多菌株复配效果优于单菌株,但不同菌株组合的功能存在一定差异,可根据植物生长需求进一步优化菌株配比。

参考文献:

- [1] 马晨, 马履一, 刘太祥, 等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 28-32. MA C, MA L Y, LIU T X, et al. Research progress on saline land improvement technology[J]. *World Forestry Research*, 2010, 23(2): 28-32.
- [2] 李丽丽, 李锐娟, 李炎艳, 等. 利用外源NO缓解植物盐胁迫伤害的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(4): 27-31. LI L L, LI R J, LI Y Y, et al. Research progress on alleviating plant salt stress damage by using exogenous NO[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2020, 48(4): 27-31.
- [3] SUDHIR P, MURTHY S D S. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis[J]. *Photosynthetica*, 2004, 42(4): 481-486.
- [4] SOHYEON P, JWAKYUNG S, SUYEON L, et al. Early growth, carbohydrate and phytic acid contents of germinating rice seeds under NaCl stress[J]. *Korean Journal of Crop Science*, 2006, 51: 137-141.
- [5] 王仁雷, 华春, 刘友良. 盐胁迫对水稻光合特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 11-14. WANG R L, HUA C, LIU Y L. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics in rice[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(4): 11-14.
- [6] 周毅, 崔丰磊, 杨萍, 等. 盐胁迫对不同品种水稻幼苗生理生化特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 90-93. ZHOU Y, CUI F L, YANG P, et al. Effects of salt stress on physiological and biochemical characteristics of different rice seedlings[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(1): 90-93.
- [7] 高青海, 郭远远, 吴燕, 等. 盐胁迫下外源褪黑素和Ca²⁺对甜瓜幼苗的缓解效应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1925-1931. GAO Q H, GUO Y Y, WU Y, et al. Alleviation effects of melatonin and Ca²⁺ on melon seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1925-1931.
- [8] 刘友良, 毛才良, 汪良驹. 植物耐盐性研究进展[J]. 植物生理学通讯, 1987(4): 1-7. LIU Y L, MAO C L, WANG L J. Recent progress in studies on salinity tolerance in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1987(4): 1-7.
- [9] 齐琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2020, 18(8): 2741-2746. QI Q, MA S R, XU W D. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(8): 2741-2746.
- [10] 冯伟东, 张益民, 杨明进, 等. 宁夏水稻产业结构调整的途径思考[J]. 中国稻米, 2021, 27(2): 84-88. FENG W D, ZHANG Y M, YANG M J, et al. Thinking about the way of rice industrial structure adjustment in Ningxia[J]. *China Rice*, 2021, 27(2): 84-88.
- [11] 罗成科, 田蕾, 毕江涛, 等. 种稻年限对盐碱土微量元素及水稻产量和品质的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1577-1584. LUO C K, TIAN L, BI J T, et al. Effects of rice planting years on saline-alkali soil trace elements, rice yield and quality[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(8): 1577-1584.
- [12] 樊丽琴, 李磊, 吴霞, 等. 种植方式对宁夏银北灌区盐碱地土壤水热盐及玉米生长的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1403-1408. FAN L Q, LI L, WU X, et al. Effects of planting patterns on soil moisture, temperature, salt content and maize growth in a saline land of Yinbei irrigation area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6): 1403-1408.
- [13] BHATTACHARYA D, YU S M, LEE Y H. Volatile compounds from *Alcaligenes faecalis* JBCS1294 confer salt tolerance in *Arabidopsis thaliana* through the auxin and gibberellin pathways and differential modulation of gene expression in root and shoot tissues[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 75(1): 297-306.
- [14] 刘少芳, 王若愚. 植物根际促生细菌提高植物耐盐性研究进展[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 1-12. LIU S F, WANG R Y. Advance in research on plant salt tolerance improved by plant-growth-promoting rhizobacteria[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(2): 1-12.
- [15] 李华山, 雷鹏, 许宗奇, 等. 耐盐促生菌 *Agrobacterium* sp. DF-2 增强黄瓜幼苗耐盐性的研究[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(3): 654-661. LI H S, LEI P, XU Z Q, et al. Halotolerance in cucumber seedlings enhanced by plant growth-promoting rhizobacterium *Agrobacterium* sp. DF-2[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 33(3): 654-661.
- [16] 韩庆庆, 贾婷婷, 吕昕培, 等. 枯草芽孢杆菌 GB03 对紫花苜蓿耐盐性的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(9): 1423-1428. HAN Q Q, JIA T T, LÜ X P, et al. Effect of *Bacillus subtilis* GB03 on salt tolerance of alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014,

- 50(9):1423-1428.
- [17] 姚丹, 牛舒琪, 赵祺, 等. 梭梭根际枯草芽孢杆菌 WM13-24 对多年生黑麦草耐盐性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7419-7429. YAO D, NIU S Q, ZHAO Q, et al. Induced salt tolerance of ryegrass by *Bacillus subtilis* strain WM13-24 from the rhizosphere of *Haloxylon ammodendron*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7419-7429.
- [18] 江绪文, 陈嘉斌, 李贺勤, 等. 芽孢杆菌 DY-3 提高烟草幼苗的耐盐性[J]. 植物生理学报, 2016, 52(6): 941-947. JIANG X W, CHEN J B, LI H Q, et al. *Bacillus aquimaris* strain DY-3 improves salt-tolerance of tobacco seedlings[J]. *Plant Physiology Journal* 2016, 52(6): 941-947.
- [19] 郭英, 刘栋, 赵蕾. 生防枯草芽孢杆菌胞外植酸酶对小麦耐盐性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(1): 39-43. GUO Y, LIU D, ZHAO L. Effect of extracellular phytase produced by *Bacillus subtilis* T2 on salt tolerance of wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(1): 39-43.
- [20] 李志萍, 张文辉, 崔豫川. NaCl 和 Na₂CO₃ 胁迫对栓皮栎种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 742-751. LI Z P, ZHANG W H, CUI Y C. Effects of NaCl and Na₂CO₃ stresses on seed germination and seedling growth of *Quercus variabilis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 742-751.
- [21] 张治振, 李稳, 周起先, 等. 不同水稻品种幼苗期耐盐性评价[J]. 作物杂志, 2020(3): 92-101. ZHANG Z Z, LI W, ZHOU Q X, et al. Salt tolerance evaluation of different rice varieties at seedling stage[J]. *Crops*, 2020(3): 92-101.
- [22] 苍晶, 赵会杰. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013. CANG J, ZHAO H J. Experimental course of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [23] 黄玉梅, 张杨雪, 刘庆林, 等. 水杨酸对盐胁迫下百日草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(7): 97-105. HUANG Y M, ZHANG Y X, LIU Q L, et al. Effects of salicylic acid on seed germination and seedling physiological characteristics of *Zinnia elegans* under salt stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(7): 97-105.
- [24] 赵红, 徐芬芬, 熊安琪, 等. 不同种类盐胁迫对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(17): 5842-5847. ZHAO H, XU F F, XIONG A Q, et al. Effects of different salt stress on seed germination and seedling of rice[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(17): 5842-5847.
- [25] 信彩云, 马惠, 赵庆雷, 等. 不同浓度 NaCl 胁迫对水稻种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2019, 36(3): 7-10. XIN C Y, MA H, ZHAO Q L, et al. Effects of salt stress on rice seed germination and seedling growth[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2019, 36(3): 7-10.
- [26] HAN Q Q, LÜ X P, BAI J P, et al. Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 525.
- [27] FAN P F, CHEN D T, HE Y N, et al. Alleviating salt stress in tomato seedlings using *Arthrobacter* and *Bacillus megaterium* isolated from the rhizosphere of wild plants grown on saline-alkaline lands[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(11): 1113-1121.
- [28] 武珈亦, 黄洁, 白志刚, 等. 盐胁迫下外源功能微生物调控水稻生长特征研究[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 34-36. WU J Y, HUANG J, BAI Z G, et al. Study on growth characteristics of rice regulated by exogenous functional microorganisms under salt stress[J]. *China Rice*, 2020, 26(1): 34-36.
- [29] CHAVES M M, FLEXAS J, PINHEIRO C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell[J]. *Ann Bot*, 2009, 103(4): 551-560.
- [30] 束胜, 郭世荣, 孙锦, 等. 盐胁迫下植物光合作用的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 53-61. SHU S, GUO S R, SUN J, et al. Research progress on photosynthesis under salt stress[J]. *China Vegetables*, 2012(18): 53-61.
- [31] 孙璐, 周宇飞, 李丰先, 等. 盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3265-3272. SUN L, ZHOU Y F, LI F X, et al. Impacts of salt stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of sorghum seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3265-3272.
- [32] 周万海, 冯瑞章, 师尚礼, 等. NO 对盐胁迫下苜蓿根系生长抑制及氧化损伤的缓解效应[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3606-3614. ZHOU W H, FENG R Z, SHI S L, et al. Nitric oxide protection of alfalfa seedling roots against salt-induced inhibition of growth and oxidative damage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3606-3614.
- [33] 王燕, 刘青, 华春, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下水稻根系抗氧化酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 161-165. WANG Y, LIU Q, HUA C, et al. Effects of exogenous spermidine on anti-oxidative enzyme activities in rice seedling roots under salt stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 161-165.
- [34] 徐晨, 凌风楼, 徐克章, 等. 盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 280-286. XU C, LING F L, XU K Z, et al. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(3): 280-286.
- [35] 宁建凤, 郑青松, 杨少海, 等. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 325-330. NING J F, ZHENG Q S, YANG S H, et al. Impact of high salt stress on *Apocynum venetum* growth and ionic homeostasis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 325-330.
- [36] 侍瑞高, 赵慧云, 戚名扬, 等. 外源氯化胆碱和氯化钙对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 22-26. SHI R G, ZHAO H Y, QI M Y, et al. Effects of exogenous choline chloride and calcium chloride on germination and physiological characteristics of wheat under salt stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(14): 22-26.
- [37] 韩静, 李旭芬, 石玉, 等. 盐胁迫下外源 Si 和 Spd 对番茄幼苗生长及光合荧光特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(11): 17-23. HAN J, LI X F, SHI Y, et al. Effect of exogenous silicon and spermidine on growth and photosynthetic fluorescence characteristics of tomato seedlings under salt stress[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(11): 17-23.

- [38] 冯莉, 张玲华, 田兴山. 荧光假单胞菌对烟草根际微生物种群数量及根系活力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 537-539. FENG L, ZHANG L H, TIAN X H. Effects of *Pseudomonas fluorescens* on rhizosphere microorganisms and root activity of tobacco[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl): 537-539.
- [39] 胡亚杰, 韦建玉, 卢健, 等. 枯草芽孢杆菌在农作物生产上的应用研究进展[J]. 作物研究, 2019, 33(2): 167-172. HU Y J, WEI J Y, LU J, et al. Research progress of *Bacillus subtilis* application in crops production[J]. *Crop Research*, 2019, 33(2): 167-172.
- [40] 王恩军, 李善家, 韩多红, 等. 中性盐和碱性盐胁迫对黑果枸杞种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 23(6): 64-69. WANG E J, LI S J, HAN D H, et al. Effect of neutral and alkaline salt stresses on germination and seedling growth of *Lycium ruthenicum*[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 23(6): 64-69.
- [41] 张超强, 杨颖丽, 王莱, 等. 盐胁迫对小麦幼苗叶片 H_2O_2 产生和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(1): 71-75. ZHANG C Q, YANG Y L, WANG L, et al. Effect of salt stress on H_2O_2 production and antioxidant enzyme activities in leaves of two wheat varieties[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 2007, 43(1): 71-75.
- [42] CHEN L, LIU Y P, WU G W, et al. Induced maize salt tolerance by rhizosphere inoculation of *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9[J]. *Physiologia Plantarum*, 2016, 158(1): 34-44.
- [43] 韩冰, 贺超兴, 郭世荣, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(12): 2492-2497. HAN B, HE C X, GUO S R, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on osmoregulation substance contents and antioxidant enzyme activities of cucumber seedlings under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(12): 2492-2497.
- [44] 田宇曦, 闵勇, 杨自文, 等. 多粘类芽孢杆菌研究进展[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(18): 3401-3404. TIAN Y X, MIN Y, YANG Z W, et al. Research progress of *Paenibacillus polymyxa*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(18): 3401-3404.
- [45] 周法永, 卢布, 顾金刚, 等. 我国微生物肥料的发展阶段及第三代产品特征探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 12-17. ZHOU F Y, LU B, GU J G, et al. Chinese microbial fertilizer features in its developmental stages and a discuss on the third-generation product innovation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(1): 12-17.
- [46] 王利平, 代林远, 李鹏. 苏云金芽孢杆菌研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(9): 224-227. WANG L P, DAI L Y, LI P. Research advances on *Bacillus thuringiensis*[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 38(9): 224-227.
- [47] 熊乙, 欧翔, 贾蓉, 等. 阿氏芽孢杆菌应用研究进展[J]. 生物技术, 2018, 28(3): 302-306. XIONG Y, OU X, JIA R, et al. Research progress in application of *Bacillus aryabhattai*[J]. *Biotechnology*, 2018, 28(3): 302-306.
- [48] 杨鑫, 杜全能, 齐文武, 等. 花生内生菌的分离及促生长作用初步研究[J]. 花生学报, 2018, 47(3): 19-25. YANG X, DU Q N, QI W W, et al. Studies on the isolation and growth-promotion of endophyte in peanut[J]. *Journal of Peanut Science*, 2018, 47(3): 19-25.
- [49] 黄大野, 叶良阶, 刘晓艳, 等. 苏云金芽孢杆菌 NBIN863 菌株对番茄根结线虫的防治效果和促生作用[J]. 中国蔬菜, 2015(10): 57-60. HUANG D Y, YE L J, LIU X Y, et al. Studies on controlling effect of *Bacillus thuringiensis* NBIN863 strain on tomato root knot nematodes and its growth-promoting effect on tomato[J]. *China Vegetables*, 2015(10): 57-60.