

盐胁迫下植物根际促生菌对垂穗披碱草生长及生理生化影响

李青璞¹, 白建海², 姚拓^{1*}, 李明源^{1,3}, 王振龙¹, 张洁⁴, 李智燕⁴

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃欣海牧草饲料科技有限公司, 甘肃 兰州 730070; 3. 新疆帕米尔高原生物资源与生态自治区重点实验室, 新疆 喀什 844006; 4. 甘肃省草原技术推广总站, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探究植物根际促生菌对垂穗披碱草在盐渍化土壤中生长的影响。【方法】以课题组前期分离的4株植物根际促生菌(PGPR)为试验材料, 设置不同盐浓度处理, 采用沙培法种植垂穗披碱草(*Elymus nutans*), 将4株植物根际促生菌[(TznFn7、MYnI4、MYP(m)Jn8和TznG2)]接种剂接种在种植垂穗披碱草的河沙中, 测定不同菌株处理和不同盐浓度下垂穗披碱草生长指标和生理特性, 研究垂穗披碱草在菌株接种剂处理下的耐盐性。【结果】在150 mmol/L盐浓度下, 与CK相比各接种处理的CAT活性提高2.08%~7.35%, 接种菌株TznFn7、TznG2处理下与CK相比POD活性提高了27.24%、13.30%, 各接种处理下SOD活性提高5.18%~24.03%, 与CK相比各接种处理的MDA含量降低25.87%~47.53%。【结论】在盐胁迫下, 接种不同PGPR菌剂不仅促进垂穗披碱草生长, 同时有效提高了植物CAT、POD和SOD抗氧化酶活性, 降低了植物细胞MDA含量。本研究选用的PGPR菌株改善了盐胁迫下植物生长, 减轻了植物细胞损伤, 提高了植物耐盐性, 为盐渍化土壤的利用提供了一定的理论和实践基础。

关键词: 盐胁迫; 植物根际促生菌; 垂穗披碱草; 生理; 响应

中图分类号: S543 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)05-0115-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.05.013



盐渍土是一种障碍性土壤资源, 全球盐渍土面积约有 1.0×10^9 hm²^[1], 且每年以 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6$ hm²^[2]的速度增长, 我国盐渍土土壤面积约有 3.6×10^7 hm², 占全国可利用土地面积的4.88%^[3], 主要分布在我国北方地区和部分沿海地区^[4]。碱含量过高阻碍了植物根系利用和吸收土壤中的养分和水分, 对植物造

成了渗透胁迫、离子胁迫和氧化胁迫, 影响了植物的生长发育, 甚至导致植株死亡; 同时盐碱含量过高也影响了土壤中微生物的活性和繁殖, 改变了微生物种群和数量^[5], 对微生物造成渗透胁迫, 降低了土壤中活体微生物分泌有效酶的数量^[6]。

在植物根系1~2 mm厚的区域^[7], 存在一些有益微生物, 可以促进植物吸收利用土壤中的养分, 产生促进植物生长发育的代谢产物, 这些微生物被称为植物根际促生菌^[8](Plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)。PGPR通过不同的作用机制来刺激植物的根部代谢活动, 由此为植物和土壤带来有利的生长发育环境^[9]。PGPR的作用包括联合固氮, 降低乙烯水平, 产生铁载体和植物激素, 对病原菌拮抗, 活化养分, 提升菌根功能, 降低污染物毒性等^[10]。现有研究

收稿日期: 2023-01-14; 修回日期: 2023-04-07

基金资助: 甘肃省林草局科技创新项目(KJXC2021010);
高寒退化草地植被恢复与土壤改良菌剂研发示范项目(GSAU-TSYF-2021-011)

作者简介: 李青璞(1997-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生。
E-mail: 1069238995@qq.com

*通信作者。E-mail: yaotuo@gsau.edu.cn

表明接种 PGPR 有利于缓解盐胁迫对植物生物量积累与分配、作物产量与品质等方面造成的不利影响,通过分析植物耐盐指标的变化趋势,证明添加 PGPR 可以改变宿主植物生理代谢,提高宿主植物的抗逆性^[1]。当植物在高浓度盐离子胁迫下,其体内的叶绿体和线粒体的电子传递受到较大影响,进而使植物光合作用受到抑制,导致植物体内活性氧(ROS)含量升高。过量的活性氧导致植物体内的 DNA、蛋白质等细胞氧化损伤,由此减缓植物的生长发育^[12]。为应对不利环境,植物体会产生不同类型的抗氧化酶,包括过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)等来清除过量的活性氧。现有研究发现,PGPR 可以诱导盐胁迫植物提高抗氧化酶活性的,这是植物降低盐胁迫下活性氧(ROS)危害的重要机制。Kumar 等^[13]和 Jha 等^[14]报道,PGPR 接种处理的植物,植株抗氧化酶活性更高。

垂穗披碱草(*Elymus nutans*)是披碱草属(*Elymus*)、禾本科(*Gramineae*)麦类作物的近缘种质资源,

同时也是高寒地区优质的牧草资源,产量高,适应性强,是高寒退化草地改良的常用补播草种^[15]。目前,土壤盐渍化严重影响了垂穗披碱草种子的萌发及生长发育,造成其产量下降。为了缓解盐胁迫对它造成的伤害及提高其耐盐性,一种方法是通过添加外源物质,如添加外源硅^[16]、外源 γ -氨基丁酸(GABA)^[17]等外源物质浸种来缓解盐胁迫带给垂穗披碱草的抑制作用。此外通过添加 PGPR 也可以提高植物耐盐性,同时增加土壤中的有益微生物,在促进植物生长发育的同时也改善了土壤质量,对提高盐渍化土壤的利用有积极作用。因此,本试验选用实验室前期分离出的 PGPR 菌株,采用室内盆栽的方式来探究 PGPR 对盐胁迫下垂穗披碱草的耐盐性研究。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试菌株和垂穗披碱草种均由甘肃农业大学草业学院草地微生物多样性实验室提供^[18]如表 1。

表 1 供试菌株
Table 1 Strains for test

菌株编号	宿主植物	分类地位	地点	促生特性
TznFn7	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	<i>Pseudomonas</i>	甘肃省天祝县	溶磷,固氮, 产 ACC 脱氨酶
TznG2	燕麦 <i>Avena sativa</i>	<i>Pseudomonas</i>	甘肃省天祝县	分泌 IAA,固氮, 产 ACC 脱氨酶
MYnI4	秦艽 <i>Gentiana macrophylla</i>	<i>Flavobacterium</i>	青海省门源回族自治县	固氮, 产 ACC 脱氨酶
MYP(m)Jn8	早熟禾 <i>Poa spp.</i>	<i>Erwinia</i>	青海省门源回族自治县	溶磷,分泌 IAA,固氮,产 ACC 脱氨酶

1.2 菌液制备

采用 LB 液体培养基(10 g /L NaCl、10 g /L 胰蛋白胍和 5 g/L 酵母粉),将 pH 值调节为 7.0;用立式压力蒸汽灭菌锅在 121 ℃下对培养基灭菌 20 min;冷却后,在超净工作台上加入菌液,每 100 mL 的 LB 液体培养基分别添加 100 μ L 的母液;28 ℃、150 r/min 恒温培养摇床培养 48 h,使用紫外可见分光光度计测定菌液浓度,调节浓度至 $D_{600\text{nm}}\geq 0.5$ 时取出备用^[19]。

1.3 试验设计

本研究采用内径 5.6 cm,高 13.4 cm 的种植杯进行室内盆栽试验。试验设计 0、50 和 150 共 3 个盐浓度,接种 4 株 PGPR 菌株(TznFn7、MYnI4、MYP(m)

Jn8 和 TznG2)以及空白对照(不接菌株),每处理 3 个重复,共种植 45 杯。挑选外观饱满无损伤的垂穗披碱草种子,用 5% 的 NaClO 消毒 3 min,再用无菌水反复冲洗 6~8 次;将沙子在 0.1 Kpa,121 ℃下灭菌 15 min。把灭菌后的沙子装入种植杯中,每杯装至杯口 2.5 cm 处,每杯种植 15 粒垂穗披碱草种子,放入智能型光照培养箱,模拟室外生长条件,白天,6 000 lx 光照 14 h,温度 25 ℃;夜晚,黑暗 10 h,温度 15 ℃^[20]。

1.4 指标测定及方法

植株生长第 45 天开始收获,采用烘干法测定地上生物量和地下根重;用根系扫描仪(Deskscan System—Root Law Program,美国)对根系进行扫描,

并计算根长、根直径、根体积、根表面积等生长指标；采用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒测定丙二醛(MDA)含量、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性^[21]。

1.5 数据分析

运用 Office Excel 2016 进行数据计算和作图,采用统计软件 SPSS 21.0 中 One-way ANOVA 进行各处理间方差分析,采用 Duncan 分析方法,显著性水平判断依据为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 接种菌株对垂穗披碱草生长的影响

2.1.1 接种菌株对垂穗披碱草生物量的影响 随着盐浓度增加,各处理下的植株地上和地下干重均有不同程度的下降,但菌株处理下的植株地上和地下干重与 CK(空白对照)相比均有所增加(图 1-2)。在 0 mmol/L 盐浓度下,菌株 MYP(m)Jn8 处理下的植株地上部干重和地下部干重与 CK 相比分别提高了 63.95% 和 68.25%;50 mmol/L 盐浓度下,TznG2 菌株处理下的植株地上部干重与空白对照相比提高了 33.18%,TznFn7 菌株处理下的植株地下部干重与 CK 相比提高了 24.50%;150 mmol/L 盐浓度下,MYnI4 菌株处理的植株地上部干重与 CK 相比提高了 55.86%,MYP(m)Jn8 菌株处理的植株地下部干重与 CK 相比提高了 27.42%。

2.1.2 接种菌株对垂穗披碱草根系生长的影响 接种菌株对垂穗披碱草根长有显著促进作用,菌株

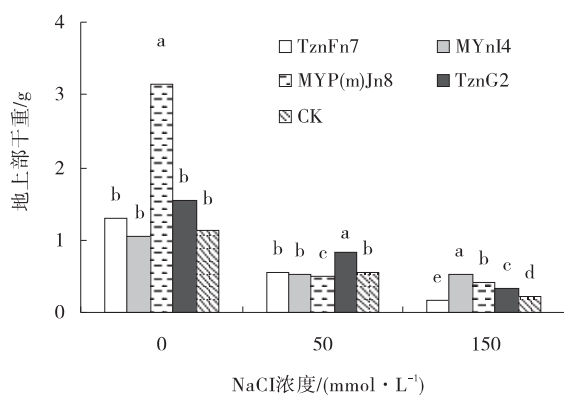


图1 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草地上部干重的影响

Fig. 1 Effect of PGPR on the above-ground dry weight of *E. nutans* at salt concentrations

注:数据柱形标注不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

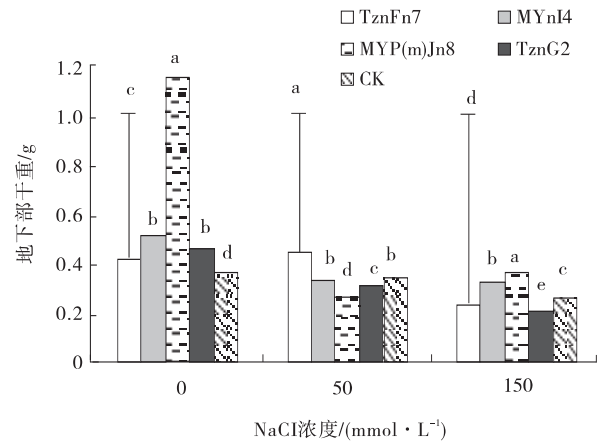


图2 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草地下部干重的影响

Fig. 2 Effect of PGPR on the under-ground dry weight of *E. nutans* at different salt concentrations

TznFn7 对根长促进作用最强,与 CK 相比,根长增加了 36.70%,接种处理对盐胁迫垂穗披碱草根长无显著影响;接种菌株对不同盐浓度处理下垂穗披碱草的根表面积、根平均直径和根体积影响作用不同。与 CK 相比,0 mmol/L 盐浓度的菌株 MYnI4 处理下,根表面积增加了 26.10%,菌株 MYP(m)Jn8 处理下,根平均直径和根体积分别增加了 19.64% 和 50%;50 mmol/L 盐浓度的菌株 TznG2 和菌株 MYnI4 处理下分别对根表面积、根体积有促进作用,其他各处理对根平均直径无显著影响;150 mmol/L 盐浓度的菌株 TznFn7 处理下,与 CK 相比其根表面积、根平均直径和根体积均有促进作用,分别增加了 36.10%、59.50% 和 82.03%,在 150 mmol/L 盐浓度胁迫下,该菌株对垂穗披碱草根系促生效果更明显(表 2)。

2.2 接种菌株对盐胁迫垂穗披碱草 MDA 含量的影响

0 mmol/L 盐浓度下,各接种处理的 MDA 含量均高于 CK;50 mmol/L 盐浓度下,接种 MYnI4 菌株和 TznFn7 菌株的 MDA 含量高于 CK,接种 MYP(m)Jn8 菌株和 TznG2 菌株的 MDA 含量低于空白对照;150 mmol/L 盐浓度下,各接种处理的 MDA 含量均显著低于 CK ($P < 0.05$),表明在该浓度下,各接种处理有效降低了植株细胞膜脂质过氧化程度,对植物细胞有一定保护作用(图 3)。

2.3 接种菌株对盐胁迫垂穗披碱草抗氧化酶系统的影响

2.3.1 接种菌株对盐胁迫垂穗披碱草 CAT 活性的影响 不同盐浓度下,接种菌株对垂穗披碱草 CAT

表2 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草根系的影响

Table 2 Effects of PGPR on root of *E. nutans* at salt concentrations

NaCl 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	菌株编号	根长/cm	根表面积/cm ²	根平均直径/mm	根体积/cm ³
0	TznFn7	120.92±12.87 ^a	75.85±4.55 ^{ab}	0.62±0.08 ^c	0.39±0.13 ^c
	MYnI4	95.92±0.95 ^{ab}	84.66±4.31 ^a	1.09±0.02 ^a	0.89±0.03 ^{ab}
	MYP(m)Jn8	107.68±19.38 ^{ab}	77.63±8.71 ^{ab}	1.12±0.03 ^a	1.06±0.18 ^a
	TznG2	97.80±4.19 ^{ab}	62.02±4.37 ^c	0.99±0.04 ^{ab}	0.75±0.05 ^{ab}
	CK-1	76.54±5.46 ^c	62.56±5.01 ^c	0.90±0.25 ^{ab}	0.53±0.26 ^c
50	TznFn7	70.73±15.23 ^a	48.49±10.81 ^b	0.44±0.12 ^a	0.23±0.06 ^c
	MYnI4	70.24±8.85 ^a	28.90±2.68 ^b	0.35±0.04 ^a	0.30±0.07 ^{ab}
	MYP(m)Jn8	93.28±5.12 ^a	47.20±6.04 ^b	0.52±0.06 ^a	0.50±0.09 ^a
	TznG2	92.87±10.06 ^a	73.24±4.23 ^a	0.53±0.03 ^a	0.33±0.04 ^{ab}
	CK-2	90.55±9.30 ^a	49.77±8.25 ^b	0.42±0.04 ^a	0.29±0.04 ^{ab}
150	TznFn7	63.82±9.58 ^a	71.42±5.32 ^a	1.21±0.07 ^a	1.28±0.28 ^a
	MYnI4	63.16±8.50 ^a	42.87±6.16 ^c	0.64±0.11 ^b	0.42±0.02 ^b
	MYP(m)Jn8	66.88±11.48 ^a	47.60±2.64 ^c	0.58±0.12 ^b	0.49±0.08 ^b
	TznG2	70.39±2.19 ^a	57.14±9.52 ^{ab}	0.49±0.017 ^b	0.25±0.09 ^b
	CK-3	71.56±8.14 ^a	45.64±2.24 ^b	0.49±0.02 ^b	0.23±0.02 ^b

注:同列不同小写字母表示不同处理间有显著差($P<0.05$),误差为标准误,下同。

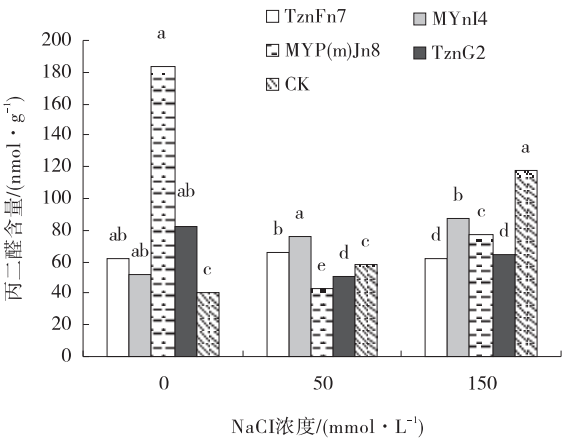


图3 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草MDA含量的影响

Fig. 3 Effect of PGPR on the MDA content of *E. nutans* at salt concentrations

活性的影响为0 mmol/L盐浓度下,除菌株TznFn7处理下植株过CAT活性低于CK外,其他处理下植株过CAT活性与对CK比无显著差异,50 mmol/L盐浓度下各接种处理的CAT活性均低于CK,150 mmol/L盐浓度下,接种MYnI4菌株的植株CAT活性与CK相比无显著差异,其他接种处理则提高了植株CAT活性,提高范围在2.08%~7.35%(图4)。

2.3.2 接种菌株对盐胁迫垂穗披碱草POD活性的影响 随着盐浓度增加,垂穗披碱草POD活性呈上升趋势,不同盐浓度下,菌株TznG2处理下植株POD活性显著高于CK ($P<0.05$),而在50 mmol/L和

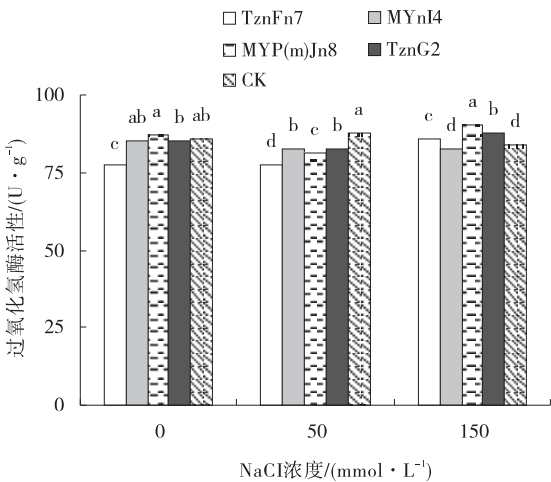


图4 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草CAT活性的影响

Fig. 4 Effect of PGPR on CAT activity of *E. nutans* at salt concentrations

150 mmol/L盐浓度下,接种菌株MYnI4对植株POD活性与CK相比无显著差异。在150 mmol/L盐浓度下,菌株TznFn7、TznG2处理下植株POD活性达到最高,与CK相比POD活性提高了27.24%、13.30%(图5)。

2.3.3 接种菌株对盐胁迫垂穗披碱草SOD活性的影响 SOD活性随盐浓度的增大呈下降趋势,当盐浓度在0 mmol/L时,此时垂穗披碱草未受到盐胁迫,菌株接种处理下植株SOD活性均低于CK。在50、150 mmol/L盐浓度下,分别接种菌株TznG2、MYP(m)

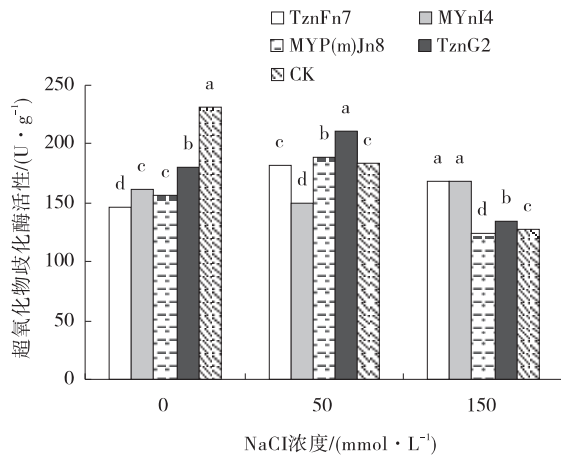


图 5 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草 POD 活性的影响

Fig. 5 Effect of PGPR on POD activity of *E. nutans* at salt concentrations

Jn8 和菌株 TznFn7、MYnI4 显著提高植株 SOD 活性 ($P < 0.05$), 提高范围在 2.49%~31.63% (图 6)。

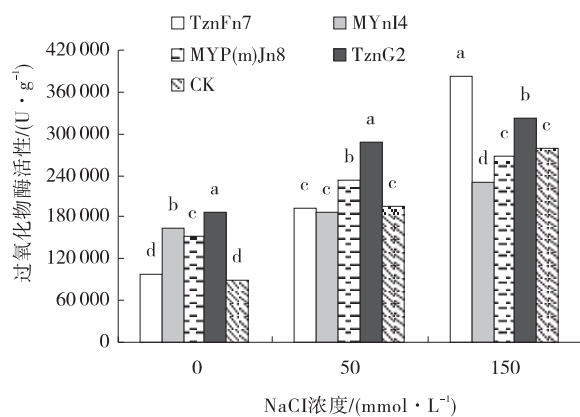


图 6 盐浓度下促生菌对垂穗披碱草 SOD 活性的影响

Fig. 6 Effect of PGPR on SOD activity of *E. nutans* at different salt concentrations

3 讨论

3.1 不同盐浓度下 PGPR 对垂穗披碱草生长的影响

在自然界中,盐胁迫是非生物胁迫中常见的一种,严重影响植物的生长和发育(如影响植株株高、根长、地上和地下生物量),从而导致作物减产。植物的生物量是最能直接反映植物的生长能力的指标,在植物逆境研究中,通常分为地上生物量和地下生物量两部分进行研究^[22-23]。在本试验中,接种 PGPR 菌剂后,垂穗披碱草地下干重均显著高于对照,说明 PGPR 菌株有效促进了植株根系生长,为植物抵御盐胁迫环境提供了帮助。近年来,研究人员通过分离和筛选出不同的植物根际促生菌,并研制成菌剂或菌肥来提升

植物在逆境(如干旱、寒冷和高盐等)条件下的生长和发育,同时也在一定程度上改善作物品质,提高作物产量。代金霞等^[24]研究发现,利用 PGPR 构建复合菌群对紫花苜蓿和柳枝稷有明显的促生效果,其促生效果均展现出地上生物量优于地下。韩文星等^[25]的研究表明,通过单施 PGPR 菌肥或 PGPR 菌肥+半量化肥处理发现,燕麦株高、地上植物量、地下植物量、粗蛋白、粗脂肪含量均显著高于对照 ($P < 0.05$)。张银翠等^[26]通过筛选耐盐促生菌探究对盐胁迫燕麦生长的影响发现,不同盐浓度下各促生菌对燕麦的促生效果差异显著 ($P < 0.05$),且菌株 LrM2 在 0.6% NaCl 胁迫时显著促进燕麦总根长、根表面积、根体积和根尖数。Naz 等^[27]研究发现,在盐胁迫条件下,施用 PGPR 增加了大豆和小麦的茎高、根长和植株干重,对大豆和小麦生长有明显促生效果。

本试验中,盐浓度为 0 mmol/L 时,所有菌株处理下的垂穗披碱草根长与 CK 相比均显著增加;盐浓度为 50 mmol/L 时,各处理下的根长和根平均直径无显著差异,而菌株 TznG2 处理下的根表面积和菌株 MYP(m)Jn8 处理下的根体积显著高于 CK ($P < 0.05$),表明盐胁迫抑制了植物根长,但添加菌剂在一定程度上增加了根表面积和根体积;菌株 TznFn7 在 150 mmol/L 盐浓度处理下,与 CK 和其他菌株处理相比其根表面积、根平均直径和根体积有显著促进作用 ($P < 0.05$),说明在该盐浓度下菌株 TznFn7 对植物根系生长起到了一定促进作用。当植物处在盐分胁迫等不利环境中,接种 PGPR 菌剂能有效提升植物抗逆性,缓解盐分积累造成的损伤^[29];PGPR 在根系定殖后,微生物会释放植物激素来诱导植物体内合成激素的相关基因表达,以此加强植物各种激素的协同作用,促进根系及其形态生长和发育,来应对盐分环境导致的植物生理干旱^[30-31]。

盐渍化土壤由于过高的盐分破坏了原有的土壤结构,影响了植物根际土壤水分微环境,PGPR 在根际周围定殖后,有效改善了土壤结构和保水能力,在微生物作用下植物根系水势得到提高,土壤盐分对植物根系造成的渗透胁迫在一定程度上得到缓解^[32-33]。在 50、70 mmol/L 盐浓度下,分别在大豆作物上接种芽孢杆菌 (*Bacillus japonicum* USDA110) 和恶臭假单

胞菌(*Pseudomonas putida* TSAU1)两种微生物菌剂后发现,大豆的根长、根表面积、根直径和根体积均显著增加,并增强了大豆对氮磷营养元素的吸收能力^[34];植物根系形态可以表征植物吸收养分能力的强弱,当植物根系具有较大的根表面积和根体积时,将对植物吸收水分和养分起到积极作用^[35]。

3.2 不同盐浓度下促生菌对垂穗披碱草MDA含量及抗氧化酶活性的影响

膜质过氧化作用的产物之一是MDA,其含量反映了细胞膜质过氧化作用能力的强弱^[36]。植物在逆境胁迫下,其体内的自由基代谢平衡被打破,导致自由基在细胞中过量积累,进而引起脂过氧化作用,对细胞膜系统造成了损伤^[37]。王爱国^[38]研究发现,MDA含量在一定程度上可表征膜损伤伤害。当植物处在不利环境时,其MDA含量越低,表明植物耐盐性越高^[39]。本试验中,各接种处理在150 mmol/L盐浓度下的MDA含量均显著低于CK($P<0.05$),与CK相比各菌株处理下的MDA含量降低范围在25.87%~47.53%,说明在该盐胁迫浓度下,接种PGPR菌剂有效降低了植物细胞内MDA含量,减轻盐分积累导致的细胞膜损坏,提高植物体在高盐环境下的抗逆性。一般认为,膜系统的稳定性有利于植物在较高盐浓度下继续存活,所以植物耐盐性与其细胞膜系统具有相关性。Meta分析表明,当耐盐植物和盐敏感植物处于盐胁迫环境中时,为它接种PGPR后发现,两者体内的MDA含量分别显著降低了23.01%和23.96%,且该研究表明 Na^+ 吸收受到抑制与MDA含量的减少呈正相关,因此可以利用PGPR来增强植物的耐盐能力^[40]。

ROS(活性氧)是生物体在代谢过程中必然会产生的一类自由基,具有调控细胞生命周期的作用^[41]。在正常情况下,生物体内ROS代谢处于动态平衡状态。在盐胁迫条件下,ROS代谢紊乱,导致ROS在植物体内大量积累,若未及时清除,将对细胞膜系统造成损害,对植物体正常生命活动产生严重影响。CAT、POD、SOD则是保护植物体进行正常生命活动的重要物质,它们三者共同构成了生物体内ROS的防御系统,在减少和清除过量自由基等方面发挥重要作用^[38]。Chen等^[42]研究发现,盐胁迫条件下,为玉米接种解淀粉芽孢杆菌SQR9可保护因ROS积累而造成

的损伤,同时增加玉米耐盐性。韩冰等^[43]研究结果显示,接种丛枝菌根真菌AMF可提高SOD、POD和CAT活性,缓解芦笋盐胁迫。CAT、POD、SOD是植物体内酶促防御系统的3个重要保护酶。在低浓度盐胁迫下,植株通过提高酶活性减轻盐胁迫造成的损伤,但这种能力不会随盐浓度增加而增强,当植株在高盐胁迫环境下,保护酶活性就会降低^[44]。本研究各接种菌剂处理与不接种处理相比,垂穗披碱草CAT、POD、SOD活性均有不同程度提高,当盐浓度从0 mmol/L升高至150 mmol/L时,垂穗披碱草CAT、POD活性整体呈上升趋势,SOD活性呈下降趋势,说明接种PGPR可通过提高其抗氧化酶等清除剂的活性,及时清除植物体内ROS,从而减少由盐逆境引起的氧化胁迫对植株的伤害。郑娜等^[45]研究发现PGPR可诱导合成SOD及POD,来减少叶片中ROS损伤,从而显著增加了胁迫条件下番茄的鲜重。还有研究表明PGPR能够介导植物盐胁迫相关基因(如拟南芥AtRSA1)的变化参与ROS的清除并维持离子稳态^[46]。在150 mmol/L盐胁迫下,为小麦接种碱湖迪茨氏菌(*Dietzia natronolimnaea* STR1)后,叶和根中CAT、POD和SOD活性均显著增加,与对照相比叶中抗氧化酶基因表达提高了3倍^[47]。因此说明植物接种PGPR菌剂可以诱导抗氧化酶基因发生变化,增强植物抗氧化酶活性,以此提高植物抵御逆境胁迫的能力。

4 结论

在盐胁迫环境下,接种PGPR菌剂对垂穗披碱草地上生物量、地下生物量、根长、根表面积、根直径、根体积均有不同程度的促进作用,其中菌株MYnI4和菌株TznFn7对垂穗披碱草生长表现出较好的促生效果,显著增加盐胁迫环境中垂穗披碱草的生物量,促进了根系生长,接种菌株TznFn7显著降低了MDA含量;在不同盐浓度下接种植物根际促生菌均提高了CAT、POD和SOD的活性,减轻了盐胁迫下植株的损伤,有利于垂穗披碱草在盐渍化环境中生长。

参考文献:

- [1] Egamberdieva D, Wirth S, Bellingrath-kimura S D, *et al.* Salt-Tolerant Plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils[J]. Front Micro-

- biol, 2019, 10(2): 2791.
- [2] 刘寅, 贾黎明, 张博, 等. 滨海盐碱地绿化植物筛选及耐盐性评价研究进展[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(3): 80—85.
- [3] 柴晓彤, 顾金凤, 毛亮, 等. 微生物菌肥对盐渍化土壤中盐分离子及有机质含量的影响[J]. 上海交通大学学报, 2017(1): 78—84.
- [4] 李焕勇, 杨秀艳, 唐晓倩, 等. 植物响应盐胁迫组学研究进展[J]. 西北植物学报, 2016(12): 2548—2557.
- [5] Li M, Jiang L L, Sun Z J, *et al.* Effects of flue gas desulphurization gypsum by-products on microbial biomass and community structure in alkaline-saline soils [J]. Journal of Soils and Sediment, 2012, 12(5): 1040—1053.
- [6] 李明, 孙兆军, 陈卫民, 等. 宁夏地区盐渍化土壤微生物群落的研究现状及生物改良对其的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(4): 1042—1044+1046.
- [7] Klopfer J W, Leong J, Teintze M, *et al.* Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria [J]. Nature, 1980, 286 (2): 885—886.
- [8] 田平雅. 耐盐植物根际细菌多样性研究及促生菌筛选和复合菌群构建[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [9] Vacheron J, Desbrosses G, Bouffaud M L, *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning [J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4(6): 356.
- [10] Glick B. R, Cheng Z, Czarny J, *et al.* Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria [J]. European Journal of Plant Pathology, 1999, 119 (3): 329—339.
- [11] 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.
- [12] Muhammad H. K, Tang D F, Liz Q, *et al.* Comparative cytological and gene expression analysis reveals potential metabolic pathways and target genes responsive to salt stress in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39(12): 1245—1260.
- [13] Kumar S G, Reddy M, Sudhakar C. NaCl effects on proline metabolism in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) with contrasting salt tolerance [J]. Plant Science, 2003, 165(5): 1245—1251.
- [14] Jhay, Subramanianrb. Paddy plants inoculated with PGPR show better growth physiology and nutrient content under saline conditions [J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2013, 73(9): 213—219.
- [15] 卢宝荣. 披碱草属与大麦属系统关系的研究[J]. 植物分类学报, 1997, 35(3): 193—207.
- [16] 吴召林, 祁娟, 刘文辉, 等. 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(1): 26—32+40.
- [17] 赵旭, 陈仕勇, 刘伟, 等. NaCl 胁迫及外源 GABA 对垂穗披碱草种子萌发的影响[J]. 种子, 2021, 40(7): 39—44.
- [18] 李明源, 王继莲, 姚拓, 等. 产 ACC 脱氨酶细菌的筛选及对低温胁迫下垂穗披碱草生长的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(5): 37—45.
- [19] 徐德强, 王英明, 周德庆. 微生物学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [20] 李明源, 王继莲, 姚拓, 等. 祁连山高寒草地扁蓿豆和黄花棘豆耐冷 PGPR 的筛选及促生特性研究[J]. 农业生物技术学报, 2021, 29(11): 2074—2086.
- [21] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] 周晓果, 孙冬婧, 温远光, 等. 岩溶石漠化不同修复林分的生物量和生产力及其动态变化[J]. 广西科学, 2022, 29(1): 1—10.
- [23] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] 代金霞, 田平雅, 沈聪, 等. 耐盐植物根际促生菌筛选及促生效应研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(5): 968—975.
- [25] 韩文星, 姚拓, 席琳乔, 等. PGPR 菌肥制作及其对燕麦生长和品质影响的研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 75—84.
- [26] 张银翠, 姚拓, 赵桂琴, 等. 耐盐促生菌筛选鉴定及对盐胁迫燕麦生长的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2645—2652.
- [27] Naz I, Bano A, Ul-Hassan T. Isolation of phytohormones producing plant growth promoting rhizobacteria from weeds growing in Khewra salt range, Pakistan and their implication in providing salt tolerance to Glycine max L [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(21): 64—83.
- [28] Bharti N, Pandey S S, Barnawal D, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria Dietzia natronolimnaea modulates the expression of stress responsive genes providing protection of wheat from salinity stress [J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1—16.

- [29] Zhang H, Kim M. S, Sun Y, *et al.* Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2008, 6(21): 737-744.
- [30] Egamberdieva D, Kucharova Z. Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 2(45): 563-571.
- [31] Raheem A. Ali B. Halotolerant thizobacteria: beneficial plant metabolites and growth enhancement of *Triticum aestivum* L. in salt-amended soils [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 12(61): 1691-1705.
- [32] Waheed Q A, Nasim S A. Bacterial exopolysaccharide and biofilm formation stimulate chickpea growth and soil aggregation under salt stress[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2012, 43(3): 1183-1191.
- [33] Sandhya V. Ai S. Z, Grover M, *et al.* Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45 [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 46(1): 17-26.
- [34] Egamberdieva D, Wirth S, Jabborova D, *et al.* Coordination between *Bradyrhizobium* and *Pseudomonas* alleviates salt stress in soybean through altering root system architecture [J]. *Journal of Plant Interaction*, 2017, 12(5): 100-107.
- [35] Moran J F, Becana M, Iturbe-Ormaetxe I, *et al.* Drought induces oxidative stress in pea plants[J]. *Planta*, 1994, 194(3): 346-352.
- [36] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 等. 干旱半干旱地区生物结皮层藓类植物氨基酸和营养物质组成特征及适应性分析[J]. *生态学报*, 2005, 35(6): 1247-1255.
- [37] 汤章城, 王育启, 吴亚华, 等. 不同抗旱品种高粱苗中脯氨酸累积的差异[J]. *植物生理学报*, 1986, 8(2): 154-162.
- [38] 王爱国. 丙二醛作为脂质过氧化指标的探讨[J]. *植物生理学通讯*, 1986, 8(2): 55-57.
- [39] Kaur N, Dhawan M, Sharma I, *et al.* Interdependency of reactive oxygen species generating and scavenging system in salt sensitive and salt tolerant cultivars of rice [J]. *BMC plant biology*, 2016, 16(1): 1-13.
- [40] Pan J, Peng F, Xue X, *et al.* The growth promotion of two salt-tolerant plant groups with PGPR inoculation: a meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2019, 11(2): 378.
- [41] 孙国荣, 彭永臻, 阎秀峰, 等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. *林业科学*, 2003, 15(1): 165-167.
- [42] Chen L, Liu Y P, Wu G W, *et al.* Induced maize salt tolerance by rhizosphere inoculation of *Bacillus amyloliquefaciens* SQR 9 [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.
- [44] 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.
- [45] 郑娜, 柯林峰, 杨景艳, 等. 来源于污染土壤的植物根际促生细菌对番茄幼苗的促生与盐耐受机制[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(1): 47-0052.
- [46] Sukweenadhi J, Kim Y. J, Choi E. S, *et al.* *Paenibacillus yonginensis* DCY84T induces changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression against aluminum, drought, and salt stress [J]. *Microbiological research*, 2015, 172: 7-15.
- [47] Bharti N, Pandey S. S, Barnawal D, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria *Dietzia natronolimnaea* modulates the expression of stress responsive genes providing protection of wheat from salinity stress[J]. *Scientific reports*, 2016, 6(1): 1-16.

Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on growth, physiological, and biochemical responses to salt-stressed *Elymus nutans*

LI Qing-Pu¹, BAI Jian-Hai², YAO Tuo^{1*}, LI Ming-Yuan^{1,3}, WANG Zhen-Long¹,
ZHANG Jie⁴, LI Zhi-Yan⁴

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Xinhai Herbage Feed Technology Co, Lanzhou, 730070, China; 3. Key Laboratory of Biological Resources and Ecology of Pamirs Plateau in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi, 844006, China; 4. Key Laboratory of Grassland Ecosystem Grassland Technical Extension Station of Gansu Province, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the growth of *Elymus nutans* salinized soil. 【Method】 Four plant PGPR strains isolated by our research group (TznFn7, MYnI4, MYP(m)Jn8 and TznG2) were tested under varying salt concentrations. *E. nutans* was cultivated in a sand culture system, and the growth indices and physiological characteristics were assessed under different strain treatments and salt levels. The study focused on salt tolerance of *E. nutans* following PGPR inoculation. 【Result】 Results demonstrated that at a salt concentration of 150 mmol/L, catalase (CAT) activity increased by 2.08% to 7.35%, while peroxidase (POD) activity rose by 27.24% and 13.30% with TznFn7 and TznG2 inoculations, compared to control (CK). Superoxide dismutase (SOD) activity increased between 5.18% and 24.03% across all inoculated strains, and malondialdehyde (MDA) content decreased from 25.87% to 47.53% compared to CK. Inoculation with different PGPR strains not only promoted the growth of *E. nutans* under salt stress but also enhanced the activities of CAT, POD and SOD, while reducing MDA content in plant cells. This alleviated the cellular damage and improved the plant's resilience to saline conditions. 【Conclusion】 The PGPR strains selected in this study significantly enhanced plant growth and salt tolerance, providing a theoretical and practical basis for the utilization of saline soils.

Key words: salt stress; plant growth-promoting rhizobacteria; *Elymus nutans*; physiologic; response

(责任编辑: 靳奇峰)