

DOI:10.11686/cyxb2021369

http://cyxb.magtech.com.cn

苗阳阳, 张艳蕊, 宋标, 等. 碱蓬根际和内生细菌菌株对盐碱胁迫下苜蓿生长的影响. 草业学报, 2022, 31(9): 107—117.

MIAO Yang-yang, ZHANG Yan-rui, SONG Biao, *et al.* Effects of *Suaeda glauca* rhizobacteria and endophytic bacterial strains on alfalfa growth under salt-alkaline stress. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(9): 107—117.

碱蓬根际和内生细菌菌株对盐碱胁迫下苜蓿生长的影响

苗阳阳, 张艳蕊, 宋标, 刘旭桐, 张安琪, 吕金泽, 张浩, 张小华, 欧阳佳慧, 李旺, 曲善民*

(黑龙江八一农垦大学动物科技学院草业科学系, 黑龙江省寒区饲料资源高效利用与营养调控重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为研究碱蓬根际和内生细菌菌株对盐碱胁迫下苜蓿幼苗生长的影响, 试验以龙牧801紫花苜蓿为供试品种, 将前期从碱蓬根内(JG1)、根际土壤(JT4)和茎内(JJ5)筛选出的具有较强耐盐碱胁迫能力的根际及内生细菌菌株接种于苜蓿幼苗根部。接种1周后将中性盐(NaCl、Na₂SO₄)和碱性盐(NaHCO₃、Na₂CO₃)按NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃=9:1:1:9混合, 并设置0、100、150、200 mmol·L⁻¹盐碱浓度溶液浇灌苜蓿幼苗根部, 进行盐碱胁迫处理。分析盐碱胁迫下碱蓬根际及内生细菌菌株对苜蓿生长及生理的影响, 并通过隶属函数和主成分分析综合评价碱蓬根际和内生细菌菌株对盐碱胁迫下苜蓿生长的影响。结果表明:3株促生细菌均能缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿生长的抑制作用, 促进紫花苜蓿生长, 不同促生细菌对盐碱胁迫下苜蓿促生效果为JT4>JG1>JJ5。

关键词:碱蓬; 根际细菌; 内生细菌; 盐碱胁迫; 苜蓿

Effects of *Suaeda glauca* rhizobacteria and endophytic bacterial strains on alfalfa growth under salt-alkaline stress

MIAO Yang-yang, ZHANG Yan-rui, SONG Biao, LIU Xu-tong, ZHANG An-qi, LV Jin-ze, ZHANG Hao, ZHANG Xiao-hua, OUYANG Jia-hui, LI Wang, QU Shan-min*

Department of Grassland Science, College of Animal Science and Veterinary Medicine, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Key Laboratory of Efficient Utilization and Nutrition Regulation of Feed Resources in Cold Regions of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China

Abstract: This research investigated the effects of rhizobacteria and endophytic bacteria strains on alfalfa seedling growth under salt-alkaline stress in alfalfa (*Medicago sativa*) cultivar Longmu No. 801. Rhizobacteria and endophytic bacteria from plants with strong tolerance to salt-alkaline stress were isolated from *Suaeda glauca* roots (JG1), rhizosphere soil (JT4) and stems (JJ5) and were inoculated around the roots of alfalfa seedlings. One week after inoculation, neutral salts (NaCl, Na₂SO₄) and alkaline salts (NaHCO₃, Na₂CO₃) were mixed in the proportions NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃=9:1:1:9, and the roots of alfalfa seedlings were irrigated with 0, 100, 150, 200 mmol·L⁻¹ of these salt-alkaline solutions. The effects on the growth and physiological indexes of alfalfa of these

收稿日期:2021-10-09;改回日期:2022-01-11

基金项目:黑龙江八一农垦大学学成、引进人才科研启动计划项目(XYB201813),黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划项目(ZRCPY201908),大庆市新能源领域“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021BD05)和黑龙江省科技厅省院合作项目(YS16B12)资助。

作者简介:苗阳阳(1989-),女,满族,辽宁本溪人,讲师,博士。E-mail: yangyangmiao.com@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qushanmin@126.com

inoculations under the four salt concentrations were analyzed by membership function and principal component analysis. It was found that the three growth-promoting bacteria alleviated the inhibitory effects of salt-alkaline stress on alfalfa and promoted alfalfa growth. The growth-promoting effect of the isolated bacterial strains on alfalfa seedlings under salt-alkaline stress was JT4>JG1>JJ5.

Key words: *Suaeda glauca*; rhizobacteria; endophytic bacteria; salt-alkaline stress; alfalfa

土地盐碱化治理已成为全球农业最重要的问题之一,盐分会导致耕地面积、作物生产力和作物质量大幅度下降^[1]。近年来,随着气候变化和人类生产活动的影响,土壤盐碱化程度进一步加重。盐碱化影响了全世界20%的耕地,严重威胁着农牧业生产和生态环境的建设^[2-3]。大庆地处松嫩平原西部,黑龙江省西南部,其土壤主要为苏打盐碱化草甸土和沼泽化草甸土。近年来,由于油田开发和其他人为因素的影响,土壤盐碱化逐渐加重^[4]。碱蓬(*Suaeda glauca*)是藜科(Chenopodiaceae)碱蓬属(*Suaeda*)植物,对盐碱具有高度适应性,能保护和改良土壤、消除裸露盐碱荒滩,防止水土流失,对保持和重建盐碱地生态有重要作用,被誉为盐碱地改造的“先锋植物”^[5-6]。碱蓬作为真盐生植物,体内盐含量相对较高,而绝大多数微生物生长在低盐环境中,因此推测碱蓬内生菌属于极端微生物之一的嗜盐微生物,其内生细菌和根际细菌具有特殊的生理生化性质,具有较高的研究价值^[7]。

在当前“绿水青山就是金山银山”的生态理念下,资源节约和环境保护已成为我国发展的基本国策,绿色生态也成为现代农业发展的内在要求。鉴于此,人们一直在努力寻找新的生物治理途径——在不投入巨资改变盐碱地原有性状的前提条件下,通过微生物与植物的相互作用来提高植物的耐盐碱性,改善盐碱土状况,其有望成为利用盐碱地的新措施。植物促生细菌(plant growth promoting bacteria, PGPB)包括植物根际促生细菌(plant rhizosphere growth promoting bacteria, PGPR)和定殖于植物体内的内生细菌,可促进植物生长及其对矿物质营养的吸收和利用,是一类可抑制有害生物的有益菌株^[8-9],可有效减轻植物的盐碱胁迫损伤。合理施用PGPB可促进植物生长,提高作物产量及通过诱导植物产生系统抗性来抵御生物和非生物胁迫^[10]。由于盐碱地土壤含盐量和pH都较高,酸性和中性土壤中筛选得到的PGPB在盐碱环境中很难存活定殖,在酸性、中性土壤中有很好促生效率的菌株在盐碱土中很难发挥促生作用,所以普通促生细菌在盐碱地应用困难。近年来耐盐碱促生细菌促进盐碱胁迫下植物生长的研究备受关注,研究发现接种含ACC脱氨酶(1-氨基环丙烷-1-羧酸脱氨酶)活性的根际促生菌可缓解盐碱胁迫,减缓植物体内乙烯积累,增加作物产量^[11-12]。向君亮等^[13]发现在盐碱胁迫条件下,将从大庆草原盐碱土中分离出的耐盐碱掘越氏芽孢杆菌(*Bacillus horikoshii*)S11浸种苜蓿(*Medicago sativa*)后,能显著促进苜蓿种子的萌发及幼苗的生长。刘佳莉^[14]从盐碱土植物根际筛选的促生细菌可以增加盐碱地大田中紫花苜蓿的生物量,提高紫花苜蓿的品质。

紫花苜蓿素有“牧草之王”的美誉,具有一定的耐盐碱能力,适当的盐碱胁迫不会对苜蓿的产量和营养品质造成影响,而中、重度盐碱会抑制苜蓿生长^[15]。随着草原以及耕地土壤盐碱化程度的加剧,可种植苜蓿的土地面积也逐渐减少^[16]。因此提高苜蓿的耐盐碱能力对我国畜牧业发展和盐碱地改良具有重要意义。本试验应用前期筛选的碱蓬根际促生细菌和内生细菌浇灌紫花苜蓿幼苗根部,并根据松嫩平原盐碱地盐碱成分情况,以中性盐(NaCl、Na₂SO₄)和碱性盐(NaHCO₃、Na₂CO₃)按NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃=9:1:1:9混合,并设置0、100、150、200 mmol·L⁻¹盐碱浓度胁迫苜蓿幼苗,研究碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿幼苗生长及生理的影响,为提高苜蓿耐盐碱性,改善盐碱胁迫对苜蓿生长及生理影响提供依据,为研制和开发盐碱土壤生物制剂奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 碱蓬采样区概况 盐碱样地位于黑龙江省大庆市采油三厂第五矿区周围草地,地理位置为46°41′—46°42′ N, 124°59′—124°60′ E, 试验于2019年6月采样。该地属于大陆性半干旱温带草原气候,降水量最大时期

为 7 月。土壤为盐碱土, pH 为 8.7~9.3, 主要优势植物有碱蓬、鹅观草 (*Roegneria kamoji*)、羊草 (*Leymus chinensis*)、大籽蒿 (*Artemisia sieversiana*) 等。

1.1.2 供试菌株 分别为前期从上述盐碱地采样区采集的碱蓬根内、根际土壤及茎内分离的 JG1、JT4 和 JJ5 (表 1), 经鉴定后保存在黑龙江八一农垦大学草业科学实验室。

表 1 碱蓬根际细菌和内生细菌菌株

Table 1 Rhizobacteria and endophytic bacteria of *S. glauca*

菌株编号 Strain number	菌株 Strain	分离部位 Separation site
JG1	普城沙雷氏菌 <i>Serratia plymuthica</i>	碱蓬根内 <i>S. glauca</i> root
JT4	嗜麦芽寡养单胞菌 <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	碱蓬根际土壤 <i>S. glauca</i> rhizosphere soil
JJ5	普城沙雷氏菌 <i>S. plymuthica</i>	碱蓬茎内 <i>S. glauca</i> stem

1.1.3 供试种子 紫花苜蓿种子龙牧 801 (*M. sativa* Longmu No. 801) 由黑龙江省畜牧研究所提供, 保存于黑龙江八一农垦大学草业科学实验室。

1.1.4 培养基 LB 液体培养基^[17]。

1.2 方法

1.2.1 菌悬液制备 将分离自碱蓬根际土壤及不同组织的细菌菌株 JG1、JT4 和 JJ5 接种于 LB 液体培养基, 于 28 ℃、180 r·min⁻¹ 摇床培养, 待菌体浓度达到 10⁶ cfu·mL⁻¹ 时终止培养。

1.2.2 苜蓿幼苗培养及处理 细沙洗净 150 ℃ 高温持续烘干 5 h 后, 121 ℃ 灭菌 26 min, 连续灭菌 5 次, 待冷却后装入 75% 乙醇消毒且杯底扎有网眼的塑料杯 (直径 5.0 cm, 高 11.5 cm), 将其放入水培盒中 (长 24 cm, 宽 15 cm, 高 5 cm, 350 g·杯⁻¹)。选取颗粒饱满且大小一致的苜蓿种子消毒 (75% 浸泡 30 s, 用无菌水每次 1 min 清洗 4~5 次) 后于人工气候培养箱内进行催芽后移栽至塑料杯中。每处理水培盒内加 200 mL Hoagland 有氮营养液, 使其从杯底由下至上浸湿^[18], 幼苗生长过程中用无菌蒸馏水补充水分。

待苜蓿幼苗长出真叶后, 每杯定苗 15 株, 幼苗根部浇灌碱蓬根际促生细菌和内生细菌菌悬液, 25 mL·杯⁻¹, 浇灌 7 d 后将 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃ 按照 9:1:1:9 盐碱比例混合, 盐碱溶液浓度为 0、100、150、200 mmol·L⁻¹, 25 mL·杯⁻¹ 浇灌苜蓿幼苗根部。每 15 d 浇灌 200 mL Hoagland 无氮营养液, 自然光照 45 d 收获幼苗测定相关指标。

1.3 测定指标

1.3.1 盐碱胁迫下苜蓿生长指标和生物量的测定 随机选 5 株紫花苜蓿用直尺测量绝对高度和分枝数。分别测量地上和根部鲜重^[19-20]。各指标重复测定 3 次。

1.3.2 盐碱胁迫下苜蓿根系耐盐碱性生理指标的测定 采用愈创木酚法测定过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性; 采用氮蓝四唑 (nitroblue tetrazolium, NBT) 显色法测定超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性; 采用硫代巴比妥酸 (thiobarbituric acid, TBA) 法测定丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量; 采用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸含量, 以上试验方法参考《植物生理学实验指导》^[21]。

1.3.3 盐碱胁迫下苜蓿叶片叶绿素含量的测定 采用 SPAD-502Plus 叶绿素仪 (KONICA MINOLTA, INC 公司) 测定叶片叶绿素含量。

1.3.4 综合耐盐碱性评价指标 采用隶属函数综合评价法, 对与抗性呈正相关参数的株高、分枝数、地上和根鲜重、脯氨酸、POD、SOD、叶绿素采用公式: $F_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 计算; 对与抗性呈负相关参数的 MDA, 采用公式: $F_i = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 计算。式中: X_i 为 i 个指标值; $X_{\min}$ 为 i 指标的最小值; $X_{\max}$ 为 i 指标的最大值。然后分别对细菌菌株处理的紫花苜蓿耐盐碱隶属函数值进行累加, 求平均值后得到该处理的隶属度值, 隶属度值越大, 该细菌菌株对盐碱胁迫下紫花苜蓿促生效果越好。

为筛选促生细菌对紫花苜蓿耐盐碱性的主要对比指标,对盐碱胁迫下紫花苜蓿各单项指标的耐盐系数 ω 分别进行主成分分析,其计算公式如下: ω =不同盐碱胁迫处理浓度下的单项指标平均测定值/对照组测定值。

1.4 数据分析

采用Excel 2020进行数据整理和作图。采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析($P<0.05$),试验数据以“平均值 $\pm$ 标准误”表示,采用Duncan's法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿生长和生物量的影响

2.1.1 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿株高的影响 如图1所示,盐碱浓度为0 mmol·L⁻¹时,经JT4处理后苜蓿株高显著高于CK($P<0.05$),提高26.83%;100 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4和JJ5处理后苜蓿株高均升高,但与CK均无显著差异($P>0.05$);150 mmol·L⁻¹时,经JG1和JT4处理后苜蓿株高显著高于CK($P<0.05$),分别提高122.64%和69.81%;200 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4、JJ5处理后苜蓿株高显著高于CK($P<0.05$),分别提高130.30%、196.97%和139.39%。

2.1.2 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿分枝数的影响 如图2所示,盐碱浓度为0 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4、JJ5处理后苜蓿分枝数均高于CK,其中经JT4处理后分枝数显著高于CK($P<0.05$),提高50.00%;100和150 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4和JJ5处理后苜蓿分枝数均高于CK,但无显著差异($P>0.05$);200 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4、JJ5处理后苜蓿分枝数显著高于CK($P<0.05$),分别提高100.00%、50.00%和100.00%。

2.1.3 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿鲜重的影响 不同盐碱浓度胁迫下,随盐碱浓度的升高苜蓿地上鲜重呈下降趋势,经JG1、JT4和JJ5处理后苜蓿的地上鲜重均提高(表2)。在盐碱浓度为0 mmol·L⁻¹时,经JT4处理后苜蓿地上鲜重显著高于CK($P<0.05$),提高317.64%;100 mmol·L⁻¹时,经JJ5处理后苜蓿地上鲜重显著高于CK($P<0.05$),提高149.93%;150 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4、JJ5处理后,苜蓿地上鲜重均显著高于CK($P<0.05$),分别提高156.38%、86.11%和57.25%;200 mmol·L⁻¹时,经JG1、JT4、JJ5处理后苜蓿地上鲜重均显著高于CK($P<0.05$),分别提高315.04%、136.58%和248.81%。

随盐碱浓度的升高苜蓿根鲜重呈先上升后下降趋势,经JG1、JT4和JJ5处理后苜蓿根鲜重均提高(表3)。在盐碱浓度为0 mmol·L⁻¹时,经JT4处理后根鲜重显著高于CK($P<0.05$),提高486.09%;100 mmol·L⁻¹时,经JG1和JJ5处理后,根鲜重显著高于CK($P<0.05$),分别提高109.84%和263.66%;150 mmol·L⁻¹时,经JG1、

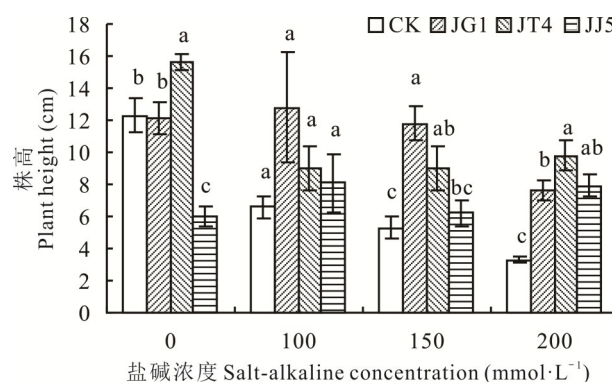


图1 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿株高的影响

Fig. 1 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on plant height of alfalfa under salt-alkaline stress

不同小写字母表示同一盐碱浓度处理下,不同菌株处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters mean there were significant differences among different strains under the same salt-alkaline concentration treatment at $P<0.05$. The same below.

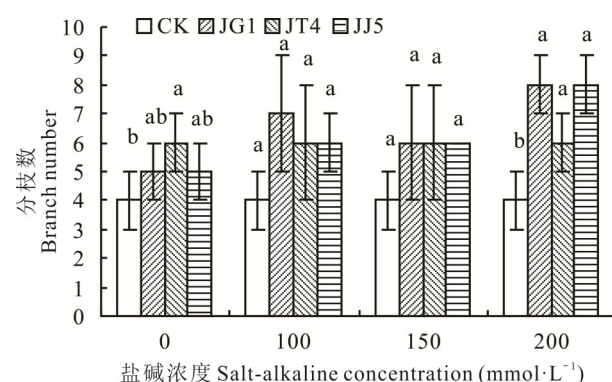


图2 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿分枝数的影响

Fig. 2 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on branches number of alfalfa under salt-alkaline stress

JT4、JJ5 处理后苜蓿根鲜重均显著高于 CK ($P<0.05$), 分别提高 182.97%、251.29% 和 1070.63%; 200 mmol·L⁻¹ 时, 经 JG1 和 JJ5 处理后根鲜重显著高于 CK ($P<0.05$), 分别提高 914.80% 和 778.75%。

表 2 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿地上鲜重的影响

Table 2 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on the aboveground fresh weight of alfalfa under salt-alkaline stress (g·5 plant⁻¹)

菌株编号 Strain number	盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (mmol·L ⁻¹)			
	0	100	150	200
CK	0.5370±0.0153b	0.4598±0.2188b	0.4175±0.0143c	0.2780±0.0134d
JG1	0.9474±0.0111b	0.5206±0.1197b	1.0704±0.1087a	1.1538±0.0716a
JT4	2.2427±0.3351a	0.6021±0.1345b	0.7770±0.0874b	0.6577±0.0144c
JJ5	0.5847±0.0767b	1.1492±0.1753a	0.6565±0.0270b	0.9697±0.0289b

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 the same column show significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

表 3 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿根鲜重的影响

Table 3 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on root fresh weight of alfalfa under salt-alkaline stress (g·5 plant⁻¹)

菌株编号 Strain number	盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (mmol·L ⁻¹)			
	0	100	150	200
CK	0.0870±0.0048b	0.3374±0.0607c	0.2560±0.0158c	0.2405±0.0231c
JG1	0.1982±0.0061b	0.7080±0.0748b	0.7244±0.0797b	2.4406±0.4290a
JT4	0.5099±0.0790a	0.5305±0.0035bc	0.8993±0.0690b	0.9783±0.4650bc
JJ5	0.1196±0.0291b	1.2271±0.1562a	2.9968±0.2218a	2.1134±0.4620ab

2.2 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿根系生理指标的影响

2.2.1 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿过氧化物酶(POD)活性的影响

随盐碱浓度的升高苜蓿 POD 活性呈先上升后下降趋势, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后苜蓿的 POD 活性均提高(图 3)。在盐碱浓度为 0 mmol·L⁻¹ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后苜蓿 POD 活性均显著高于 CK ($P<0.05$), 分别提高 58.91%、93.46% 和 58.57%; 100 mmol·L⁻¹ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后苜蓿 POD 活性均高于 CK, 但无显著差异 ($P>0.05$); 150 mmol·L⁻¹ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后, 苜蓿 POD 活性均显著高于 CK ($P<0.05$), 分别提高 51.21%、65.38% 和 71.15%; 200 mmol·L⁻¹ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后, 苜蓿 POD 活性均显著高于 CK ($P<0.05$), 分别提高 213.57%、162.51% 和 250.21%。

2.2.2 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

如图 4 所示, 盐碱浓度为 0 mmol·L⁻¹ 时, 经 JT4 和 JJ5 处理后苜蓿 SOD 活性显著高于 CK ($P<0.05$), 分别提高 57.34% 和 70.36%; 100 mmol·L⁻¹ 时, 经 JT4 处理后苜蓿 SOD 活性显著高于 CK ($P<0.05$), 提高 70.33%; 150 mmol·L⁻¹

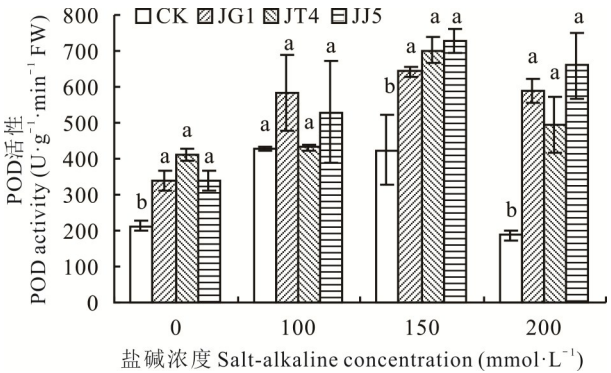


图 3 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿 POD 活性的影响

Fig. 3 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on POD activity of alfalfa under salt-alkaline stress

时, JG1、JT4 和 JJ5 均能显著提高苜蓿 SOD 活性 ($P < 0.05$), 分别提高 40.90%、132.75% 和 0.14%; 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, JG1 和 JT4 处理后苜蓿 SOD 活性显著高于 CK ($P < 0.05$), 分别提高 54.40% 和 110.69%。

2.2.3 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿丙二醛(MDA)含量的影响 如图 5 所示, 在盐碱浓度为 0 和 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 除盐碱浓度为 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时接种 JG1 后苜蓿 MDA 含量显著低于 CK (17.35%) ($P < 0.05$) 外, 其余处理的 MDA 含量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, JT4 处理后苜蓿 MDA 含量显著低于 CK (11.28%) ($P < 0.05$)。200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后苜蓿 MDA 含量与 CK 均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2.4 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿脯氨酸含量的影响 如图 6 所示, 在盐碱胁迫下随着浓度的升高苜蓿脯氨酸含量呈先升高后下降趋势, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后苜蓿的脯氨酸含量均提高。盐碱浓度为 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后脯氨酸含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 分别提高了 516.12%、686.86% 和 443.67%; 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JG1 处理后脯氨酸含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 提高了 253.14%; 150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JJ5 处理后苜蓿脯氨酸含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 提高了 525.61%; 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JT4 处理后苜蓿脯氨酸含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 提高了 528.38%。

2.2.5 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿叶片叶绿素含量的影响 如图 7 所示, 盐碱浓度为 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, JG1 和 JT4 处理后苜蓿叶片叶绿素含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其含量分别提高 45.24% 和 51.59%; 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JG1、JT4 和 JJ5 处理后苜蓿叶片叶绿素含量均显著高于 CK ($P < 0.05$); 150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, JT4 和 JJ5 处理后苜蓿叶片叶绿素含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 其含量分别提高 51.64% 和 48.14%; 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经 JJ5 处理后苜蓿叶片叶绿素含量显著高于 CK ($P < 0.05$), 含量提高 67.68%。

2.3 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿生长影响的隶属函数分析

如表 4 所示, 通过隶属函数法进行耐盐碱性综合

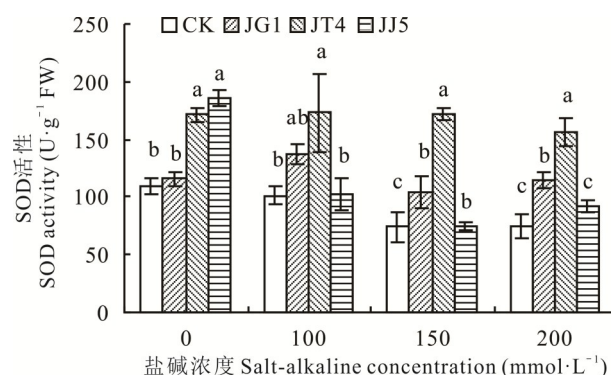


图 4 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿 SOD 活性的影响

Fig. 4 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on SOD activity of alfalfa under salt-alkaline stress

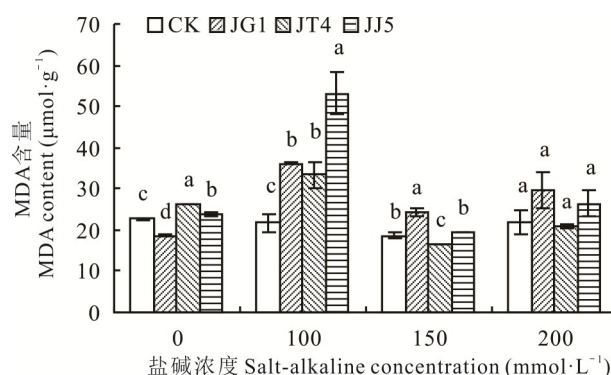


图 5 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on MDA content of alfalfa under salt-alkaline stress

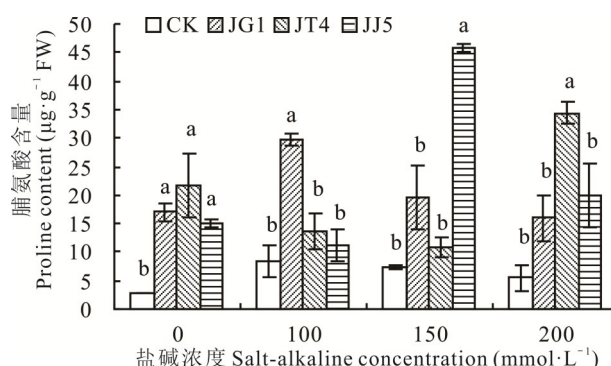


图 6 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿脯氨酸含量的影响

Fig. 6 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on proline content of alfalfa under salt-alkaline stress

评价,0 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下隶属函数值排序及耐盐碱性从大到小依次为:JT4>JG1>CK>JJ5,在不同盐碱胁迫下,隶属函数值排序及耐盐碱性从大到小均为:JT4>JG1>JJ5>CK。表明经碱蓬根际促生细菌和内生细菌处理后均能提高苜蓿的耐盐碱能力。

2.4 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿生长影响的主成分分析

由表 5 可知,碱蓬根际促生细菌和内生细菌对 0 mmol·L⁻¹浓度下苜蓿耐盐碱性指标主成分分析共获得 3 个主成分,第 I 主成分中指标所对应的特征向量中株高、分枝数、地上鲜重、地下鲜重数值较大,主要反映出盐碱胁迫下促生细菌对苜蓿的生长具有促进作用。第 II 主成分指标所对应的特征向量中 MDA 数值较大,为 0.82,主要反映出盐碱胁迫下碱蓬根际和内生细菌可减弱盐碱胁迫下苜蓿细胞的损伤。第 III 主成分中指标所对应的特征向量中叶绿素数值较大,主要反映出盐碱胁迫下碱蓬根际和内生细菌具有促进生长的作用。

表 4 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿耐盐碱指标隶属函数分析

Table 4 Comprehensive analysis of membership function values of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on alfalfa salt-alkaline tolerance indexes under salt-alkaline stress

菌株编号 Strain number	盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (mmol·L ⁻¹)							
	0		100		150		200	
	平均值 Mean	综合排名 Rank	平均值 Mean	综合排名 Rank	平均值 Mean	综合排名 Rank	平均值 Mean	综合排名 Rank
CK	0.114	3	0.000	4	0.034	4	0.019	4
JG1	0.448	2	0.388	2	0.427	2	0.546	2
JT4	1.677	1	1.185	1	1.164	1	1.125	1
JJ5	-0.217	4	0.001	3	0.053	3	0.107	3

碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿耐盐碱性指标主成分分析中,第 I 主成分中株高、分枝数、地上鲜重、地下鲜重数值较大,主要反映出盐碱胁迫下促生细菌和内生细菌对苜蓿的生长具有促进作用。第 II 主成分中,当盐碱浓度为 100 mmol·L⁻¹时,POD 数值较大,盐碱浓度为 150 mmol·L⁻¹时,SOD 数值较大,200 mmol·L⁻¹时,MDA 数值较大。主要反映出盐碱胁迫下碱蓬根际促生细菌和内生细菌可提高渗透调节能力,减弱盐碱胁迫下苜蓿细胞的损伤。第 III 主成分中指标所对应的特征向量中脯氨酸数值较大,主要反映出盐碱胁迫下碱蓬根际促生细菌和内生细菌可提高苜蓿渗透调节能力,提高其耐盐碱胁迫能力。

3 讨论

3.1 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿生产特性的影响

逆境对植物个体形态发育具有显著影响,主要表现在植物组织和器官生长方面。生长抑制是植物对逆境胁迫最直接的表现,也是评价植物耐性最直观的指标。本研究表明,接种 3 株促生细菌菌株后均促进苜蓿的生长,当盐碱浓度增加时,促生细菌表现出的促生效果更好。与向君亮等^[13]的研究结果类似,非盐碱胁迫条件下接种耐盐碱菌株 S11 后,苜蓿种子的发芽率、发芽势、株高、根长和叶绿素含量与对照相比并没有显著差异,但盐碱胁迫条件下,接种 S11 处理后促进了种子萌发和幼苗生长。本研究也发现在无盐碱胁迫时,仅 JT4 对苜蓿株高、分枝数、鲜重有显著促进作用,说明菌株在正常生长环境下对苜蓿的促生长作用不明显,可能是因为 3 株菌株分离自盐碱环境,而正常处理时的环境不适宜菌株的生长,没有在幼苗根部定殖,从而未发挥促生长作用。当盐碱浓度

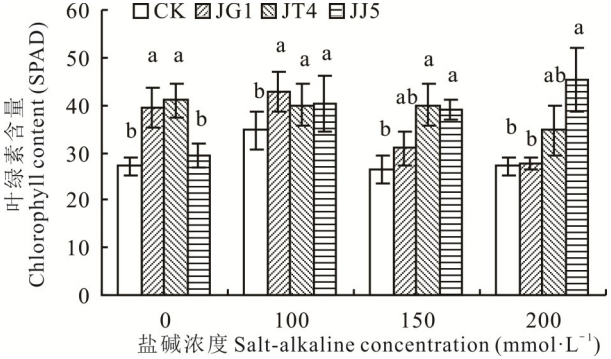


图 7 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿叶片叶绿素含量的影响

Fig. 7 Effects of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on leaf chlorophyll content of alfalfa under salt-alkaline stress

表5 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿耐盐碱性指标主成分分析

Table 5 Principal component analysis of salt-alkaline tolerance index of *S. glauca* rhizosphere growth-promoting bacteria and endophytic bacteria on alfalfa under salt-alkaline stress

项目 Item	苜蓿耐盐碱性指标 Salt-alkaline tolerance indexes of alfalfa									特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution (%)	累积贡献率 Cumulative contribution (%)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉			
盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (0 mmol·L ⁻¹)												
I	0.98	0.96	0.95	0.94	0.91	0.84	0.57	0.49	0.51	6.03	66.98	66.98
II	0.13	-0.19	-0.22	0.19	0.13	-0.42	0.82	-0.79	0.45	1.83	20.29	87.26
III	-0.12	0.22	0.24	-0.28	-0.40	-0.34	0.05	0.38	0.73	1.15	12.74	100.00
盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (100 mmol·L ⁻¹)												
I	0.99	0.93	0.88	0.85	0.78	0.35	0.63	0.68	0.28	5.00	55.53	55.53
II	-0.10	-0.28	0.10	-0.50	-0.55	0.92	0.77	0.71	-0.65	3.01	33.41	88.94
盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (150 mmol·L ⁻¹)												
I	0.99	0.98	0.83	0.71	0.57	0.58	0.56	0.17	0.45	4.36	48.45	48.45
II	0.09	-0.16	-0.37	0.65	0.81	-0.77	-0.66	0.48	0.44	2.71	30.06	78.51
III	-0.07	-0.08	-0.42	0.27	0.14	0.25	0.49	0.86	-0.78	1.93	21.49	100.00
盐碱浓度 Salt-alkaline concentration (200 mmol·L ⁻¹)												
I	0.99	0.97	0.93	0.90	0.72	0.56	0.59	0.47	0.60	5.35	59.46	59.46
II	-0.06	-0.23	-0.32	-0.43	0.70	0.14	0.81	0.79	-0.77	2.70	29.99	89.45

注: X₁~X₉:株高、分枝数、地上鲜重、根鲜重、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、丙二醛、脯氨酸、叶绿素。Note: X₁~X₉: Plant height, branch number, aboveground fresh weight, root fresh weight, SOD, POD, MDA, proline, chlorophyll.

逐渐升高至200 mmol·L⁻¹时,3株促生细菌对苜蓿的株高、分枝数和地上鲜重均有显著促进作用,消除了盐碱胁迫对苜蓿生长的抑制作用,拓宽了苜蓿在盐碱胁迫下生长的生态幅,增加了盐碱地种植苜蓿的可行性。本研究利用实验室前期从大庆盐碱土上生长的碱蓬根内(JG1)、茎内(JJ5)和根际土壤内(JT4)筛选出来的3株促生细菌处理盐碱胁迫的紫花苜蓿,说明菌株对混合盐碱具有良好的适应能力,具有一定的应用价值。

3.2 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿生理特性的影响

盐碱胁迫下紫花苜蓿的SOD、POD活性和脯氨酸含量下降,MDA含量升高,对植株造成了严重伤害致使产量下降。植物的抗氧化酶系统可以有效清除植物体内代谢活动产生的活性氧以减少不同程度的氧化损伤。SOD是植物细胞清除氧自由基伤害的第一道防线,是生物体内一种很重要的抗氧化酶类,对于保护细胞免受氧化损伤有十分重要的作用,SOD活性可以不同程度地反映出植物对环境胁迫的抗逆情况^[22-23]。POD是植物在逆境条件下酶促防御的关键酶之一,与SOD和过氧化氢酶(catalase, CAT)相互协调配合,以提高植物的抗逆性^[24]。接种JG1、JT4、JJ5后苜蓿根系的SOD和POD活性均升高,减轻了盐碱对紫花苜蓿生长的不利影响。说明3株促生细菌菌株诱导抗氧化酶(SOD和POD)活性,高活性的抗氧化酶与氧化应激耐受性有关,植物的耐受性与抗氧化剂的产生有关。MDA一般作为植物逆境指标,MDA含量的多少反映了膜损伤程度的大小,是常用的膜脂过氧化指标之一^[25]。高于150 mmol·L⁻¹盐碱胁迫下,接种碱蓬根际促生细菌和内生细菌后可减弱根系MDA含量增加的趋势,苜蓿损伤程度减小。脯氨酸含量被认为是研究植物抗逆性的重要指标,脯氨酸积累在逆境中对植物有保护作用^[26],经碱蓬根际促生细菌和内生细菌处理后苜蓿脯氨酸的含量升高,可见碱蓬根际促生细菌和内生细菌可以提高苜蓿的耐盐碱胁迫能力。盐碱土种植的紫花苜蓿接种促生细菌后,紫花苜蓿的脯氨酸含量显著增加,MDA含量降低,抗氧化酶SOD、POD活性显著增强,与紫花苜蓿株高和生物量的增加相对应,表明促生细菌菌株可以通过增加保护物质的积累和提高抗氧化酶的活性来缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿造成的影响^[14]。

叶绿素是植物进行光合作用的主要物质,苜蓿叶片光合特性、生理代谢和光合产物代谢的变化可共同影响植株生长发育。接种促生细菌可增加促进苜蓿幼苗光合色素和叶片叶绿素含量,导致光合能力增强,从而积累更多

的有机物,同时运输到地下部^[27],故本研究中添加3株菌株后苜蓿幼苗地上部和地下部生物量显著增加,进而提高紫花苜蓿的生产性能。说明选用的3株碱蓬根际促生细菌和内生细菌在促进植物适应逆境胁迫方面具有良好的应用潜力,但对盐碱胁迫下苜蓿整个生长周期的生长和产量等的影响及其机理等方面还有待更进一步的研究。目前高通量测序技术比较普及,后续试验应通过借助高通量测序技术探索3株菌株促进植物生长及增强植物抗盐碱性的作用机理。

3.3 碱蓬根际促生细菌和内生细菌对盐碱胁迫下苜蓿的隶属函数值排序及耐盐碱性综合评价

植物耐盐碱性是由多种因素间的交互影响及协同作用而决定的,选取单一指标进行耐盐碱性评定具有一定的局限性。因此本研究采用模糊隶属函数及主成分分析法综合评价促生细菌对苜蓿的耐盐碱性影响。通过生长指标和生理指标共9个成分进行主成分分析并结合隶属函数值排序,表明不同促生细菌对盐碱胁迫下苜蓿促生效果为JT4>JG1>JJ5。从碱蓬根内筛选的促生细菌JG1和从碱蓬根际土壤筛选的JT4对缓解苜蓿耐盐碱性效果优于从茎内筛选的JJ5。由于土壤和植物根内微环境比茎内复杂,微生物通过复杂的环境选择压力而存活,因此根际细菌比植物内生细菌效果好。而高洁云^[28]发现根际中的细菌其ACC脱氢酶活性高于植物体内的细菌,能提高植物的抗盐性,本试验结果与其基本一致。JG1和JJ5属于沙雷氏杆菌,谢金宏^[29]研究了水稻(*Oryza sativa*)根际微生物对改良盐碱地的作用,发现在沙雷氏杆菌的作用下,盐碱土地的pH有所降低,土壤有机质含量增加,是因为其分泌几丁质酶可以分解土壤中昆虫骨骼的几丁质,从而增加了土壤有机质含量和降低了土壤pH。促生细菌JT4属于嗜麦芽寡养单胞菌,在农业生产领域有着巨大的应用前景,一些寡养单胞菌属菌株可以分泌合成抵抗致病性的酶,降低植物患病的概率^[30],单胞菌属菌含有重金属抗性基因,对重金属有强耐受性和强还原力,以及对氯化农药有强降解能力^[31],因此可以提高植物的抗性。

4 结论

3株促生细菌均能缓解盐碱胁迫对紫花苜蓿的抑制作用,促进紫花苜蓿生长,不同促生细菌对盐碱胁迫下苜蓿促生效果为JT4>JG1>JJ5。

参考文献 References:

- [1] Yamazaki K, Ishimori M, Kajiya-Kanegae H, *et al.* Effect of salt tolerance on biomass production in a large population of sorghum accessions. *Breed Science*, 2020, 70(2): 167–175.
- [2] Li M, Chen R, Jiang Q, *et al.* *GmNAC06*, a NAC domain transcription factor enhances salt stress tolerance in soybean. *Plant Molecular Biology*, 2021, 105(3): 333–345.
- [3] Liu Q, Gao Y N, Liu X, *et al.* Effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on growth of *Medicago sativa* under saline-alkaline stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6143–6155.
刘倩, 高娅妮, 柳旭, 等. 混合盐碱胁迫下接种丛枝菌根真菌和根瘤菌对紫花苜蓿生长的影响. *生态学报*, 2018, 38(17): 6143–6155.
- [4] Wang S. Biodiversity and polyphasic taxonomy of culturable halophilic bacteria and archaea from saline-alkaline soil in Daqing. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
王爽. 大庆盐碱土可培养嗜盐细菌与古菌多样性及多相分类研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] Bai S H, Ma F Y, Hou D, *et al.* Change in population niche during vegetation community succession in the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 581–587.
白世红, 马风云, 侯栋, 等. 黄河三角洲植被演替过程种群生态位变化研究. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 581–587.
- [6] Yang C, Chen H Y, Li J S, *et al.* Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline-alkaline land. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10): 1578–1586.
杨策, 陈环宇, 李劲松, 等. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应. *中国生态农业学报*, 2019, 27(10): 1578–1586.
- [7] Hu Y L, Li H D, Wang H F, *et al.* Enzyme screening and isolation of *Suaeda salsa* endophytes. *Journal of Tangshan Normal University*, 2018, 40(6): 70–72, 76.
胡宇玲, 厉海笛, 王会芳, 等. 盐地碱蓬内生菌的分离及功能酶的检测. *唐山师范学院学报*, 2018, 40(6): 70–72, 76.
- [8] Ma X, Cheng Y, Ma R L. Research progress of plant growth-promoting mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria.

- Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(5): 148—154.
- 马欣, 成妍, 马蓉丽. 植物根围促生细菌促生机制研究进展. 山东农业科学, 2019, 51(5): 148—154.
- [9] Cao M M, Wang F, Zhou B H, *et al.* Community distribution of the rhizospheric and endophytic bacteria of *Phragmites australis* and their limiting factors in iron tailings. Environmental Science, 2021, 42(10): 4998—5009.
- 曹曼曼, 王飞, 周北海, 等. 铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析. 环境科学, 2021, 42(10): 4998—5009.
- [10] Kang Y J, Cheng J, Mei L J, *et al.* Action mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 232—238.
- 康贻军, 程洁, 梅丽娟, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(1): 232—238.
- [11] Zahir Z A, Zafar-ul-Hye M, Sajjad S, *et al.* Comparative effectiveness of *Pseudomonas* and *Serratia* sp. containing ACC—deaminase for coinoculation with *Rhizobium leguminosarum* to improve growth, nodulation, and yield of lentil. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(4): 457—465.
- [12] Estevez J, Dardanelli M S, Megias M, *et al.* Symbiotic performance of common bean and soybean co-inoculated with rhizobia and *Chryseobacterium balustinum* Aur9 under moderate saline conditions. Symbiosis, 2009, 49(1): 29—36.
- [13] Xiang J L, Tang C R, Wang J Q, *et al.* Screening and identification of *Medicago sativa* Linn growth promoting rhizobacteria under saline-alkali stress. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 266—272.
- 向君亮, 唐呈瑞, 王佳琦, 等. 盐碱胁迫下一株促进苜蓿生长的细菌筛选与鉴定. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 266—272.
- [14] Liu J L. Isolation of plant growth promoting rhizobacteria and the mechanism of relieving saline-alkaline stress on alfalfa. Harbin: Harbin Normal University, 2017.
- 刘佳莉. 植物根际促生细菌的筛选及其缓解紫花苜蓿盐碱胁迫的作用研究. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [15] Zhao X, Ye L. Effects of salt alkali stress on growth, quality and photosynthetic characteristics of alfalfa. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(21): 176—180.
- 赵霞, 叶林. 盐碱胁迫对紫花苜蓿生长、品质及光合特性的影响. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 176—180.
- [16] Wu Y, Tian Y, Zhang H X, *et al.* Effects of salinity, alkalinity, temperature and their interactions on seed germination of *Medicago falcata*. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1847—1853.
- 武祎, 田雨, 张红香, 等. 盐、碱胁迫与温度对黄花苜蓿种子发芽的影响. 草业科学, 2015, 32(11): 1847—1853.
- [17] Jiang Y M, Gao Y M, Yao T, *et al.* Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on the growth of *Uraria crinita* and *Triticale Wittmack*. Pratacultural Science, 2018, 35(8): 1910—1918.
- 蒋永梅, 高亚敏, 姚拓, 等. 植物根际促生菌(PGPR)对非宿主植物猫尾草和小黑麦生长的促生作用. 草业科学, 2018, 35(8): 1910—1918.
- [18] Shi D C, Zhao K F. Effects of sodium chloride and carbonate on growth of *Puccinellia* and on present state of mineral elements in nutrient solution. Acta Prataculturæ Sinica, 1997, 6(2): 51—61.
- 石德成, 赵可夫. NaCl和Na₂CO₃对星星草生长及营养液中主要矿质元素存在状态的影响. 草业学报, 1997, 6(2): 51—61.
- [19] Yang H T, An F H, Zhao D D, *et al.* Biological characteristics responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to soil salinity alkalinity. Soils and Crops, 2019, 8(3): 242—250.
- 杨洪涛, 安丰华, 赵丹丹, 等. 土壤盐碱化对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)生物学特征的影响. 土壤与作物, 2019, 8(3): 242—250.
- [20] Tong S P, Liang Z W, Guan F C, *et al.* Biodiversity characteristics and biomass of artificial transplanting *Leymus chinensis* grassland in soda saline-alkali land of Songnen Plain. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 22—27.
- 全淑萍, 梁正伟, 关法春, 等. 松嫩平原苏打盐碱地羊草人工移栽草地生物多样性特征和生物量. 草地学报, 2019, 27(1): 22—27.
- [21] Cai Y P. Experimental guide for plant physiology. Beijing: China Agricultural University Press, 2014.
- 蔡永萍. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [22] Ding Y F, Jin P, Liu P. Advances in gene expression, activity regulation and stress resistance of plant SOD. Biology Teaching, 2012, 37(7): 6—8.
- 丁义峰, 靳萍, 刘萍. 植物SOD的基因表达、活性调节及抗逆作用研究进展. 生物学教学, 2012, 37(7): 6—8.
- [23] Dou J H, Yu S X, Fan S L, *et al.* SOD and plant stress resistance. Molecular Plant Breeding, 2010, 8(2): 359—364.
- 窦俊辉, 喻树迅, 范术丽, 等. SOD与植物胁迫抗性. 分子植物育种, 2010, 8(2): 359—364.

- [24] Wang L. Research on salt tolerant peroxidases in wheat and arsenic resistant transgenic plant. Jinan: Shandong University, 2009.
王乐. 山融 3 号小麦耐盐相关过氧化物酶基因及植物抗砷基因工程初步研究. 济南: 山东大学, 2009.
- [25] Fu M Y. Biological and physiological-biochemical characteristics of high-yield insect-resistant transgenic *Bt* cotton “SCRC21”. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
傅明焱. 转 *Bt* 基因抗虫棉鲁棉研 21 号高产的生物学和生理生化特性. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [26] Wang C P, Chen J W, Qiao G X. Proline inhibits plant root growth through signal of auxin pathway in *Arabidopsis thaliana*. Plant Physiology Journal, 2017, 53(8): 1428—1434.
王翠平, 陈建伟, 乔改霞. 脯氨酸通过影响生长素途径相关信号抑制拟南芥根的生长. 植物生理学报, 2017, 53(8): 1428—1434.
- [27] Miao Y Y, Zhou T, Shi S L, *et al.* Effect of boron on migration and colonization by rhizobia and seedling growth in *Medicago sativa*. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(4): 120—133.
苗阳阳, 周彤, 师尚礼, 等. 硼对根瘤菌在紫花苜蓿体内运移和定殖及对幼苗生长的影响. 草业学报, 2017, 26(4): 120—133.
- [28] Gao J Y. Diversity of bacteria associated with Dongxiang wild rice and isolation of plant promoting bacteria containing ACC deaminase activity. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2017.
高洁云. 东乡野生稻内生、根际细菌多样性及具 ACC 脱氨酶活性菌株筛选. 南昌: 江西师范大学, 2017.
- [29] Xie J H. Studies on the improvement of saline-alkali soil and rice growth promotion by wild rice rhizosphere bacteria. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.
谢金宏. 野生稻根际细菌改良盐碱地及水稻促生的研究. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [30] Zhang Z, Yuen G Y. The role of chitinase production by *Stenotrophomonas maltophilia* strain C₃ in biological control of *Bipolaris sorokiniana*. Phytopathology, 2000, 90(4): 384—389.
- [31] Baldiris R, Acosta-Tapia N, Montes A, *et al.* Reduction of hexavalent chromium and detection of chromate reductase (ChrR) in *Stenotrophomonas maltophilia*. Molecules, 2018, 23(2): 406.