

小麦根际促生菌 XNT6-1 提高 小麦抗旱性研究

崔天娇,徐虹,李全顺,熊庆祯,刘华伟

(西北农林科技大学生命科学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:以前期从小麦‘铜麦6号’根际分离鉴定得到的层出镰孢菌(*Fusarium proliferatum*) XNT6-1为试验菌株,以‘铜麦6号’小麦为材料进行种子萌发试验,并通过人工称重控水的盆栽试验设置4个水分处理:正常浇水(no drought, ND)、轻度干旱(low drought, LD)、中度干旱(moderate drought, MD)、重度干旱(severe drought, SD),对干旱胁迫下小麦种子萌发以及幼苗生理生化特性进行分析,探究在干旱胁迫下菌株XNT6-1对小麦种子及幼苗抗旱性的影响。离体平板检测到XNT6-1具有很强的耐旱性,同时具有产铁载体、淀粉酶、蛋白酶和脂酶的能力。在一定干旱条件下,XNT6-1菌体培养液浸种后小麦种子萌发后期叶长及根长分别显著提高了20.4%和17.1%;中度干旱胁迫时,接种XNT6-1使得小麦幼苗鲜质量、干质量、株高和根长分别显著提高16.0%、20.8%、19.5%和23.2%;重度干旱胁迫时,接种XNT6-1使得小麦幼苗鲜质量、干质量、株高和根长分别显著提高36.0%、47.0%、32.4%和37.3%。根际促生菌XNT6-1能够对植物干旱胁迫起到一定缓解作用,是一株抗旱促生优良菌种资源,具有一定的农业应用前景。

关键词:小麦;根际促生菌;抗旱性;促生能力;生理特性

中图分类号:S182; S512.1; Q939.96 **文献标志码:**A

Study on enhancing drought resistance in wheat using the rhizosphere growth-promoting bacterium XNT6-1

CUI Tianjiao, XU Hong, LI Quanshun, XIONG Qingzhen, LIU Huawei

(College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: *Fusarium proliferatum* XNT6-1, obtained from the rhizosphere isolation and identification of ‘Tongmai 6’ in the previous stage, was used as the experimental strain. Tongmai 6 was used as the material for the seed germination test, with four water treatments applied through a pot test involving artificial weighing and water control: normal watering (no drought, ND), low drought (LD), moderate drought (MD), and severe drought (SD). The effects of strain XNT6-1 on drought resistance of wheat seeds and seedlings were studied by analyzing seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics under drought stress. In vitro, XNT6-1 was found to have a strong drought tolerance and the ability to produce iron carrier, amylase, protease and lipase. Under certain drought conditions, the leaf length and root length of wheat seed at the late stage of germination were significantly increased by 20.4% and 17.1%, respectively, after soaking in XNT6-1 culture medium. Under moderate drought stress, XNT6-1 inoculation significantly increased fresh mass, dry mass, plant height and root length of wheat seedlings by 16.0%, 20.8%, 19.5% and 23.2%, respectively. Under severe drought stress, XNT6-1 inoculation significantly increased fresh mass, dry mass, plant height and root length of wheat seedlings by 36.0%, 47.0%, 32.4% and 37.3%, respectively. The rhizosphere growth-promoting bacterium XNT6-1 plays a significant role in alleviating drought stress in plants and is an excellent strain for drought resistance and growth promotion, with promising agricultural applications.

Keywords: wheat; rhizosphere growth-promoting bacteria; drought resistance; growth promoting ability; physiological characteristics

收稿日期:2024-12-12

修回日期:2025-03-10

基金项目:国家自然科学基金(31772403)

作者简介:崔天娇(1998-),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为非豆科作物固氮。E-mail:15735218243@163.com

通信作者:刘华伟(1975-),男,陕西临潼人,博士,副教授,主要从事非豆科作物内生固氮的分子机理研究。E-mail:bioche@nwafu.edu.cn

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是我国三大粮食作物之一,对国家粮食生产的可持续发展有重要影响^[1],但其生长过程中常常面临着各种生物和非生物胁迫^[2],干旱是其中较为严重的非生物胁迫之一。土壤水分不足会使小麦植株地上部分及根系生长受阻导致产量及品质下降^[3-5]。研究表明,我国作为主要干旱国家目前干旱和半干旱地区面积大约覆盖了土壤面积的一半^[6],因此提高作物抗旱能力具有重要意义。目前主要通过定向筛选耐旱基因获得耐旱品种或添加生物肥料等方式提高作物的抗旱能力^[7],葛晓兰等^[8]在用 20% PEG-6000 处理胡杨后,*PeERF1* 转基因植株生长状态、叶绿素含量、丙二醛和过氧化物酶等相关生理指标均发现显著变化,即 *PeERF1* 对转基因杨树响应干旱起到了正向调控的作用。然而挖掘植株耐旱基因从而进行分子设计育种往往要花费巨大的时间及人力成本,且容易受到多种因素限制^[9]。因此,寻获能够有效缓解植物干旱胁迫的微生物菌种资源,探究其对胁迫下植物生长和土壤改良的作用,对促进作物稳产高产具有重要意义。

植物根际促生菌 (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) 是一些能够长期生活在土壤、根表面以及根内组织的有益微生物,在植物生长过程中起着促进植物吸收营养、抵抗不良环境等作用^[10-11]。研究表明,PGPR 可以通过固定大气中的氮、溶解土壤中不能被直接利用的元素或者合成植物生长发育所需的物质等方式促进植物的生长,也可以增强植物对生物以及非生物胁迫的抵抗力^[12],同时能够改善土壤结构、提高土壤有机质含量等^[13]。本研究基于前期从小麦根际分离、筛选到的层出镰孢菌 (*Fusarium proliferatum*) 菌株 XNT6-1,对其进行耐旱性以及促生能力检测,探究其进一步应用价值。通过模拟种子及幼苗干旱试验,分析 XNT6-1 在干旱胁迫下对种子萌发及幼苗生长的作用,旨在提高关于 XNT6-1 增强植物抗旱性的认识,以期利用根际促生菌提高植物抗逆性的实践提供优良菌种资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

层出镰孢菌 (*Fusarium proliferatum*) 菌株 XNT6-1 由实验室前期从‘铜麦 6 号’小麦根际分离并保存。供试小麦品种为‘铜麦 6 号’,由陕西大唐种业股份有限公司提供,大田种植成熟收获后长期

保存。

1.2 试验设计

1.2.1 菌株 XNT6-1 耐旱性检测 PEG-6000 在浓度大于 8% 时影响琼脂的凝固,制备含不同 PEG-6000 浓度的平板时参照刘艳霞^[14]体外抗旱菌株筛选的方法并加以改进。将 PDA 培养基灭菌后制备平板,加入不同浓度的 PEG-6000 溶液 (0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%),得到含不同浓度 PEG 的 PDA 平板培养基。使用无菌打孔器在菌落平板中心打 5 mm 菌饼,菌丝面朝上放置于每个培养基平板中心,封口倒置于 28℃ 培养箱中进行黑暗培养,培养 5 d 后观察。

1.2.2 菌株 XNT6-1 促生特性检测 为了检测 XNT6-1 的溶磷、解磷、固氮、解钾、产铁载体、产淀粉酶、产蛋白酶以及产脂酶能力,分别配制相应的培养基^[15-16],接种菌饼后,观察是否有透明圈或特征颜色反应出现。

1.2.3 菌株 XNT6-1 对干旱条件下小麦种子萌发的影响 (1) 在超净工作台中,用无菌打孔器在菌落平板上取直径 5 mm 的菌饼数个,放入含有 100 mL 马铃薯葡萄糖液体培养基 (PDB) 的锥形瓶中,于 28℃ 摇床,180 r · min⁻¹ 震荡培养 5 d,制备菌株培养液。(2) 选取饱满且均一的小麦种子,75% 酒精消毒 5 min 后用 0.1% HgCl₂ 消毒 3 min,最后用无菌水冲洗 5~7 次。将种子分别浸泡于菌株培养液和无菌水中,于 28℃、180 r · min⁻¹ 摇床上震荡 2 h,准备播种。(3) 采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫,设置 2 个试验因素,因素 1 为接菌与不接菌处理,因素 2 为不同 PEG-6000 浓度 (0%、5%、10%) 的水分处理,每个处理重复 3 次。接菌或未接菌处理过的小麦种子分别放入 9 cm 直径的培养皿中,每皿 30 粒,铺上灭菌滤纸,加入相应浓度的 PEG-6000 溶液 10 mL,25℃、16 h 光照/8 h 黑暗条件下培养。(4) 以种子露白为发芽标准,统计发芽率和发芽势,种子萌发 7 d 后,随机选取 10 株测定根长、叶长、鲜质量和干质量。

1.2.4 小麦苗期试验 (1) 取试验田距地表 0~30 cm 土壤,经过自然风干和过筛处理备用。土壤基本理化性质为:pH 值 7.82,电导率 0.22 mS · cm⁻¹,速效磷 22.85 mg · kg⁻¹,速效钾 344.25 mg · kg⁻¹,全氮 1.88 g · kg⁻¹,有机质含量 27.35 g · kg⁻¹,碱解氮 87.89 mg · kg⁻¹。设置 2 个试验因素,因素 1 为接菌与不接菌处理,因素 2 为 4 种水分处理:正常浇水 (田间持水量,ND)、轻度干旱 (田间持水量 80% ±

5%,LD)、中度干旱(田间持水量 $60\% \pm 5\%$,MD)和重度干旱(田间持水量 $40\% \pm 5\%$,SD)。(2)栽培容器为 $7\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 7.3\text{ cm}$ 规格的塑料盆,放置 150 g 土壤并铺平,每盆放置 20 粒消毒种子于土壤表面,再覆盖 50 g 土壤,加无菌蒸馏水调节土壤含水量接近田间持水量。(3)萌发培养 7 d,期间所有处理保持田间持水量,7 d 后每天接菌 5 mL,对照组添加等量无菌水。14 d 后进行水分胁迫,具体操作为:每日 9:00 左右,精确称量每盆处理组的总质量,减去容器质量后得到土壤含水总量。根据土壤的蒸发损失,向每个容器中补充适量的水分,直至土壤达到设定含水量。(4)持续 30 d 后取小麦旗叶并测定各项指标,叶绿素含量用乙醇浸提法测定^[17];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[17];脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮法测定^[17];可溶性糖含量采用蒽酮法测定^[17];可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[17];超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑(NBT)法测定^[17];过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定^[17];过氧化氢酶(CAT)采用分光光度法测定^[17]。

1.3 数据分析

利用 Excel 进行数据统计,SPSS Statistics 26 软件对数据差异进行显著性分析,最后用软件 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 菌株 XNT6-1 性能检测

2.1.1 菌株 XNT6-1 抗旱性能检测 由图 1(见 90 页)可见,平板 PEG-6000 浓度在 5%~15%时(图 1B~D),菌株在平板上生长良好且长势要好于浓度为 0%时(图 1A)。随着 PEG-6000 浓度的升高,干旱胁迫强度增加,菌株在 PEG-6000 浓度为 20%~30%的平板上长势更为稀疏(图 1E~G),当平板 PEG-6000 浓度在 35%时该菌株在平板上的生长速度只有正常条件下的 1/3(图 1H)。

2.1.2 菌株 XNT6-1 促生性检测 由图 2(见 90 页)可见,菌株 XNT6-1 可在产铁载体检测平板中(图 2D)出现黄色透明圈,在产淀粉酶培养基中(图 2F)用稀释碘液覆盖平板后观察出现黄色透明圈,在产蛋白酶培养基中(图 2G)生长并且产生透明圈,在产脂酶培养基中(图 2H)生长并且产生透明圈,在解磷(图 2C)、解钾培养基(图 2E)中能够生长但未出现透明圈,在固氮培养基中几乎不能够生长且未见透明圈出现(图 2A)。

2.2 接菌对干旱胁迫下种子萌发的影响

无论是否经过菌株 XNT6-1 浸种处理,相较于正常水分,5%的 PEG 模拟干旱条件对于种子萌发后各项指标的影响并不显著。然而,当 PEG 浓度增加至 10%时,种子的萌发过程受到显著抑制。在所有的处理条件下,无论是正常水分还是模拟干旱环境,菌株 XNT6-1 的培养液浸种处理并未显著促进种子的萌发。在正常水分条件下,接种菌株 XNT6-1 后,种子的发芽势和发芽率分别下降了 11.7%和 13.3%(图 3A、B),更为明显的是在 5% PEG 模拟干旱条件下,接菌处理导致种子发芽势和发芽率的下降分别达到了 15%和 18.3%(图 3A、B),同样未能促进种子的萌发。但在种子萌发后的生长过程中,菌株 XNT6-1 却表现出了促进作用:在 10% PEG 模拟干旱条件下,经过菌株 XNT6-1 处理的种子在萌发后的生长指标上显示出明显的提高,包括叶长、根长、鲜质量和干质量,分别较对照组增加了 20.4%、17.1%、10.9%和 14.3%(图 3C~F)。

2.3 接菌对干旱胁迫下幼苗生长发育的影响

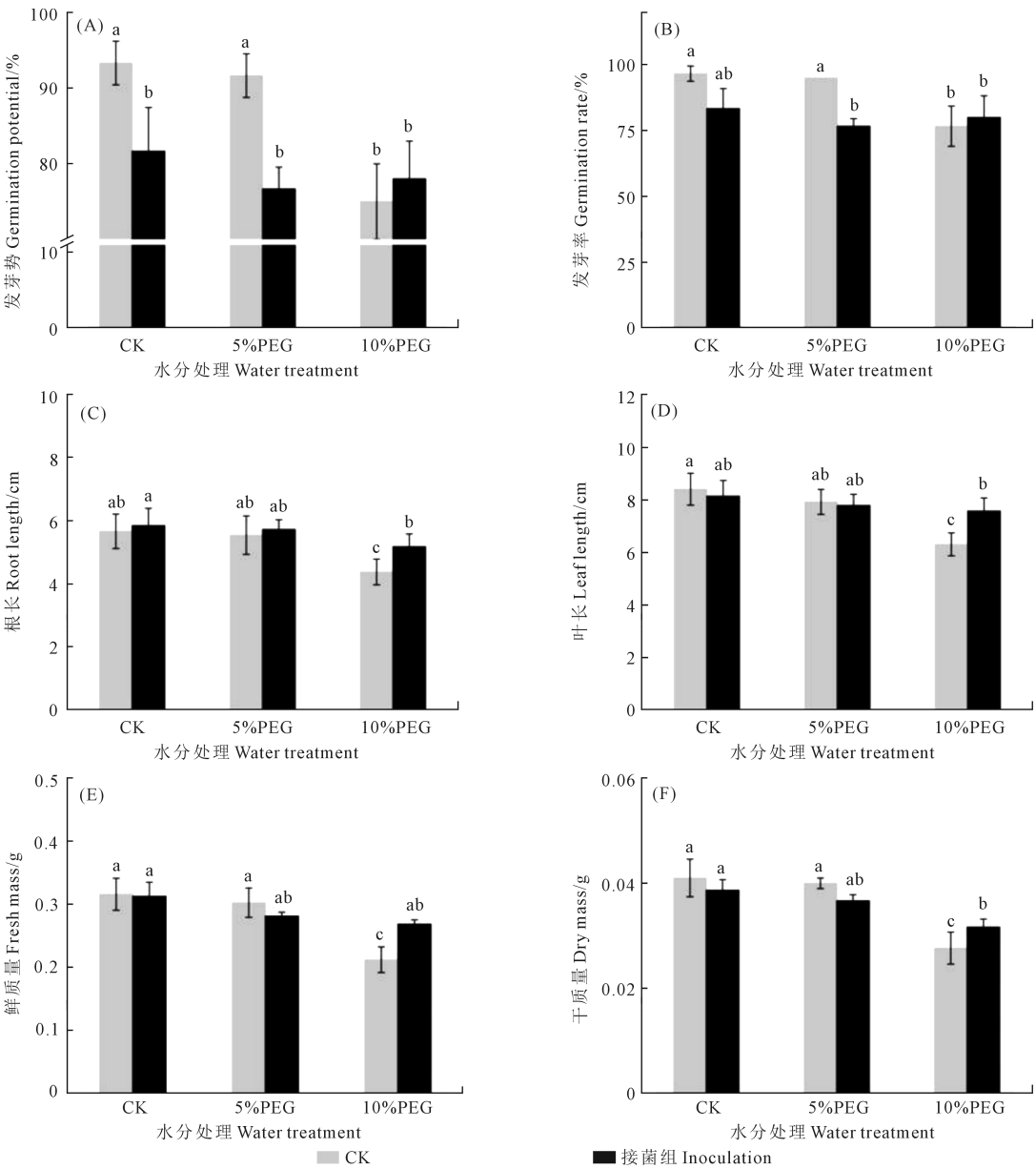
2.3.1 接菌对干旱胁迫下幼苗生长的影响 从表型来看,正常浇水的小麦幼苗表现出明显生长优势,其茎秆挺拔,生长高度明显高于胁迫组,叶片平展鲜绿,但接菌组与不接菌组表型不具有统计学差异(图 4A)。轻度干旱条件下,小麦整体形态与正常浇水相似,茎秆直立且呈现出典型的健康绿色(图 4B)。而在中、重度干旱条件下,幼苗的高度增长明显受限,叶片则变得干瘪,失水明显,出现了叶片枯黄或卷曲的现象,甚至一些叶片开始呈现干枯迹象(图 4C、D)。与不接菌相比,接菌后的小麦根长提高了 11.6%,茎粗、鲜质量、干质量和株高无明显差异。在中度干旱条件下,接菌后小麦鲜质量、干质量、株高和根长分别提高 16.0%、20.8%、19.5%和 23.2%,茎粗之间差异不显著。重度干旱时,与未接菌相比,接菌后小麦的鲜质量、干质量、株高和根长分别提高 36.0%、47.0%、32.4%和 37.3%,茎粗无显著差异(表 1)。

2.3.2 接菌对干旱胁迫下小麦幼苗叶绿素含量的影响 由图 5 可知,正常浇水处理下,接菌和未接菌处理组之间的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量差异均不显著。轻度干旱条件下,接菌组相较于未接菌的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量分别增加了 19.6%、6.0%和 14.9%。中度干旱处理下,接菌组相较于未接菌的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量显著升高了 27.8%、23.6%和 26.1%。重

度干旱处理下,接菌组相较于未接菌的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量分别增加了 28.0%、19.5% 和 25.0%。

2.3.3 接菌对幼苗渗透物质以及膜脂过氧化物含量的影响 结果如图 6 所示,无论是否接菌处理,小麦叶片中渗透物质以及膜脂过氧化物含量都会因为干旱胁迫而受到显著影响,而在正常浇水处理下,接菌和未接菌处理之间的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量、丙二醛(MDA)含量差异均不显著。在轻度干旱条件下,与不接菌相比,接菌后小麦叶

片中脯氨酸含量增加了 22.1%,丙二醛(MDA)含量降低了 9.9%,而可溶性蛋白和可溶性糖含量没有显著变化。在中度干旱处理下,接菌后小麦叶片中可溶性蛋白和脯氨酸含量较未接菌分别提高了 11.5% 和 54.4%且都具有统计学差异,丙二醛含量减少了 14.0%,而可溶性糖含量没有显著变化。重度干旱处理后,与不接菌相比,接菌后小麦叶片中可溶性蛋白和脯氨酸含量分别提升 12.3%、115.5%,丙二醛含量显著下降了 35.0%,可溶性糖含量没有显著差异。



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same figure indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

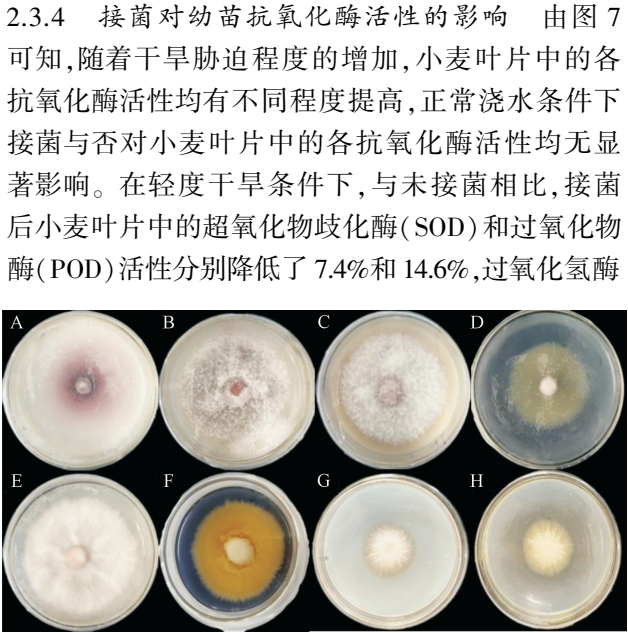
图 3 接菌对干旱胁迫下种子萌发的影响
Fig.3 Effects of inoculation on seed germination under drought stress



注:A~H 分别为含 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35% PEG 的 PDA 培养基正面,a~h 为培养基反面。
Note: A~H is the front side of PDA medium containing 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% PEG, and a~h is the back side of the medium.

图 1 菌株 XNT6-1 在含不同浓度 PEG 的 PDA 平板上的生长情况

Fig.1 Growth of fungal XNT6-1 on PDA plates containing different concentrations of PEG



注:A:固氮;B:溶磷;C:解磷;D:产铁载体;E:解钾;F:产淀粉酶;G:产蛋白酶;I:产脂酶。

Note: A: Nitrogen fixation; B: Dissolving phosphorus; C: Phosphorus solution; D: Iron-producing carrier; E: Release potassium; F: Amylase production; G: Protease production; I: Lipase production.

图 2 菌株 XNT6-1 的促生能力检测

Fig.2 Detection of the growth-promoting ability of fungal XNT6-1

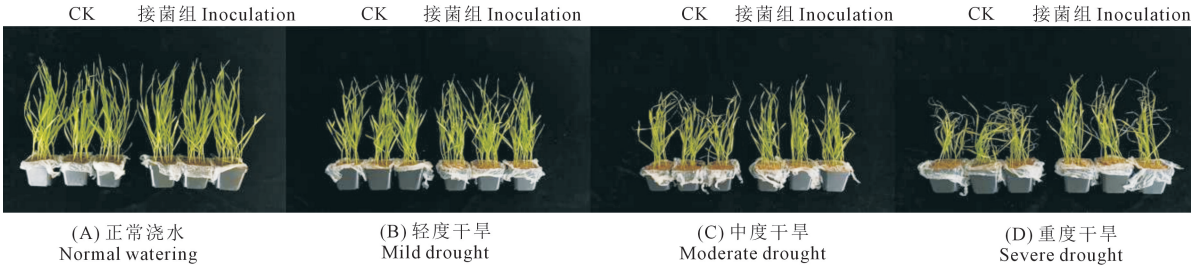


图 4 接菌对幼苗生长表型的影响

Fig.4 Effects of inoculation on seedling growth phenotype

表 1 接菌对幼苗茎粗、鲜质量、干质量、株高和根长的影响

Table 1 Effects of inoculation on stem diameter, fresh mass, dry mass, plant height and root length of seedlings

处理 Treatment	水分处理 Water treatment	茎粗 Stem diameter/mm	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	鲜质量 Fresh mass/g	干质量 Dry mass/g
CK	正常浇水 Normal watering	1.30±0.17a	28.30±2.84ab	14.40±1.12a	0.30±0.02ab	0.038±0.003a
	轻度干旱 Mild drought	1.06±0.15bc	27.20±2.09ab	12.98±1.00ab	0.29±0.03ab	0.032±0.002abc
	中度干旱 Moderate drought	0.93±0.18c	21.50±2.68cd	10.33±1.21cd	0.22±0.01bc	0.025±0.003bc
	重度干旱 Severe drought	0.95±0.06c	17.88±1.99e	8.58±0.83d	0.15±0.01d	0.017±0.003d
接菌组 Inoculation	正常浇水 Normal watering	1.33±0.13a	29.85±1.52a	14.00±0.75ab	0.32±0.01a	0.037±0.003a
	轻度干旱 Mild drought	1.11±0.13b	27.88±1.70ab	14.48±1.31a	0.28±0.03ab	0.033±0.001ab
	中度干旱 Moderate drought	0.99±0.12bc	25.70±1.94bcd	12.73±0.53bc	0.26±0.03abc	0.029±0.002bc
	重度干旱 Severe drought	0.98±0.06bc	23.68±2.72d	11.78±1.05bc	0.21±0.01c	0.025±0.002c

注:表中数值为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Values in the table are mean±standard deviation, and different lowercase letters in the same column indicate significant differences between processes ($P<0.05$).

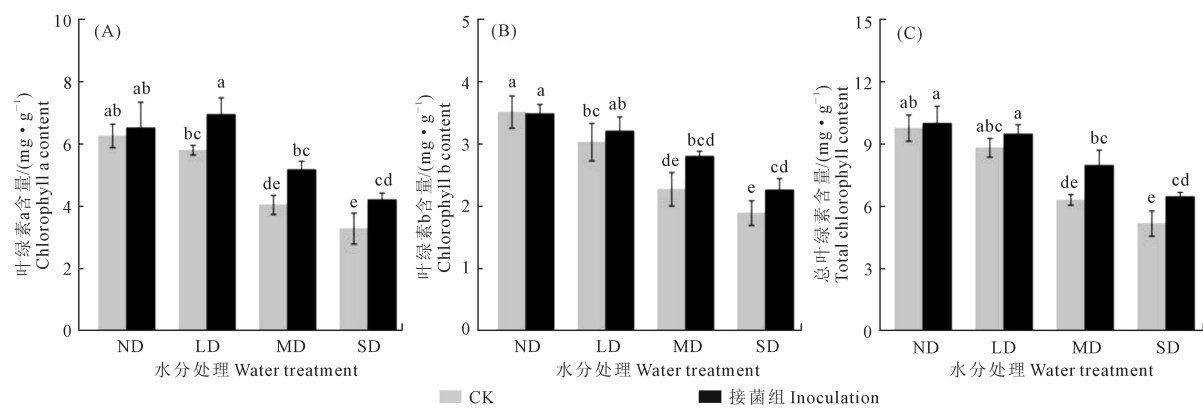


图 5 接菌对幼苗叶绿素 a、b 和总叶绿素含量的影响

Fig.5 Effects of inoculation on the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll in seedlings

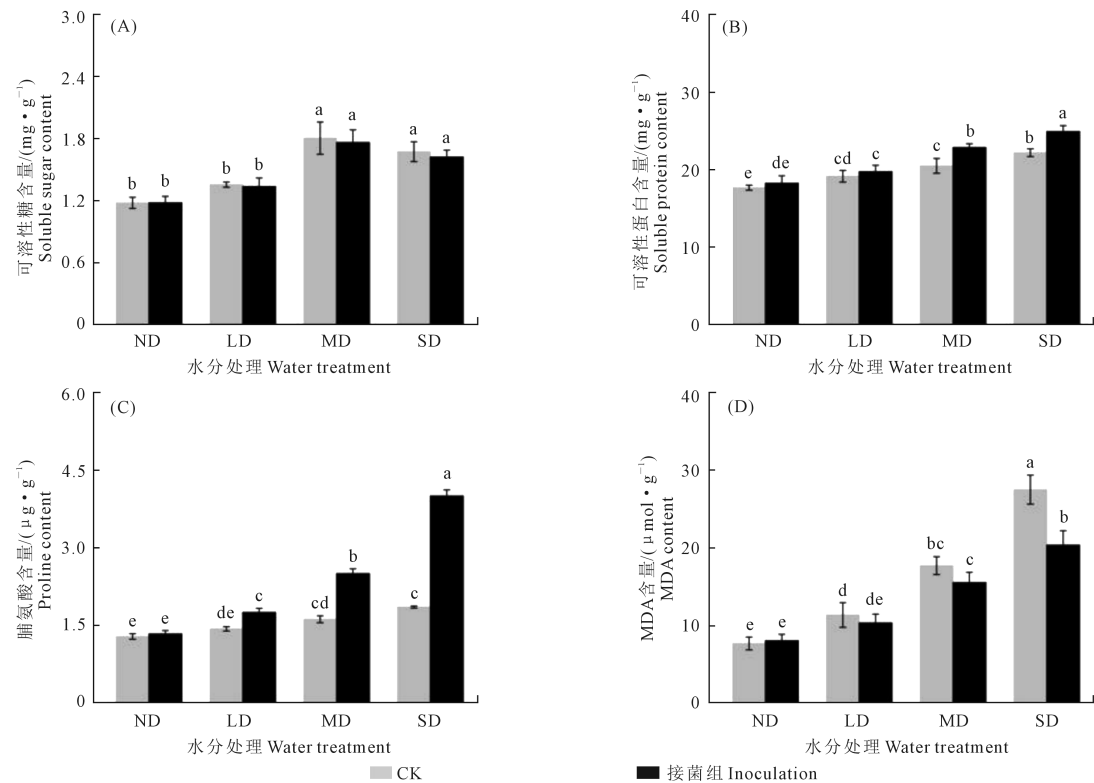


图 6 接菌对幼苗可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.6 Effects of inoculation on the contents of soluble sugar, soluble protein, proline and malondialdehyde MDA in seedlings

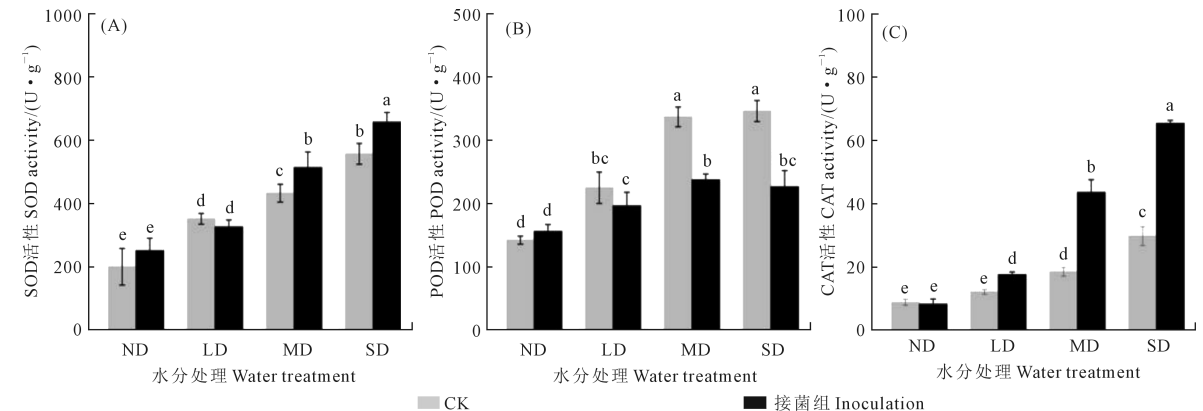


图 7 接菌对幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.7 Effects of inoculation on antioxidant enzyme activity in seedlings

(CAT)活性升高了 44.4%。在中度干旱条件下,与未接菌相比,接菌后小麦叶片中的 SOD 和 CAT 活性分别增加了 18.6% 和 135.5%,POD 活性降低了 41.9%。在重度干旱条件下,与未接菌相比,接菌后小麦叶片中的 SOD 和 CAT 活性分别提高了 17.9% 和 119.3%,POD 降低了 52.9%。这些结果表明,干旱胁迫下,植物体内抗氧化酶活性可以不同程度地提高,从而提高植株的抗逆性。

3 讨 论

植物促生菌通过固定大气中的游离氮转化为铵态氮^[18]、溶解土壤中的难溶性矿物质^[19]等多种机制促进植物生长并提高其抗逆性,尤其在干旱等胁迫条件下展现出显著的促生效应。此外,PGPR 通过产铁载体帮助植物吸收铁元素,进而提高叶绿素合成,改善光合作用效率,增强植物的抗逆能力^[20]。本研究发现,菌株 XNT6-1 表现出包括产铁载体等多重促生潜力,这些功能有助于改善植物的生长环境。同时,XNT6-1 在高浓度 PEG 胁迫下仍保持生长,表明其具有较强的耐旱潜力。结合本研究结果,XNT6-1 可能通过促进根系发育来提高植物在干旱条件下的适应能力。此外,XNT6-1 能够分泌降解纤维素、蛋白质等多种酶,有助于促进土壤有机质循环进而为植物提供营养物质^[21-23]。以上试验结果表明,菌株 XNT6-1 对于提高植物在干旱条件下的适应能力具有进一步应用价值。

干旱胁迫通常会导致种子在萌发阶段的水分吸收困难,主要是因为种子外部渗透压较高,水分难以进入种子^[24],PGPR 通过促进植物根系的发育及增强植物对水分的吸收利用能力,缓解由水分缺乏带来的负面影响^[25]。在本研究中,我们发现 5% PEG-6000 对种子萌发的负面影响相对较小,而 10% PEG-6000 处理对种子萌发产生了显著影响。这一结果说明,PEG-6000 浓度的变化能够有效模拟不同强度的干旱胁迫环境,5% PEG-6000 模拟的干旱胁迫强度较弱,尚不足以显著抑制种子萌发。而 10% PEG-6000 浓度适中,可能是研究种子活力的适宜胁迫条件。值得注意的是,XNT6-1 在种子水分充足时的作用较为有限,这可能是由于适宜的环境使得菌丝体在种子表面过多聚集,影响了种子的萌发效率,但在水分匮乏时,其促进作用则显现出来。XNT6-1 浸种萌发后,幼苗根长较未浸种显著增加($P<0.05$),对应地,幼苗叶长、鲜质量和干质

量等方面也显著增加($P<0.05$)。这一现象表明,在水分缺乏的压力下 XNT6-1 可能是通过促进根系伸展以增强种子水分获取能力,帮助其更好地适应环境。

植物在各生育时期遭遇干旱胁迫都会影响其生长发育,幼苗期最为敏感^[26]。在本试验中,中度及重度干旱胁迫下小麦幼苗生长明显受到抑制,生长表型及各生长指标较正常浇水显著弱化,而轻度干旱下小麦较正常浇水表型变化相对较小。这可能是轻度干旱胁迫对小麦幼苗的伤害较小,使得其能够通过根的延长来保证地上部分的生长。干旱胁迫特别是中度及重度胁迫下,在土壤中接种 XNT6-1 后,小麦幼苗的株高、根长等较对照组均显著提高,即菌株 XNT6-1 能够促进干旱胁迫下小麦幼苗的生长。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素^[27],参与光能的吸收、传递及转换过程。在 3 种干旱胁迫水平下接种 XNT6-1,小麦幼苗叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量较未接菌处理均显著提升,植株叶片持绿性有所提升,其原因可能是 XNT6-1 具有产铁载体能力,能够帮助植物吸收铁元素,增加铁的溶解性,提高植物代谢活力。已有的报道显示,在干旱胁迫条件下,PGPR 可以影响宿主植物体内脯氨酸等渗透调节物质的积累^[28-29]。本试验结果表明,随着干旱胁迫程度加重,无论是否接菌,植株中渗透物质含量都呈现上升的趋势,说明干旱胁迫程度与植物体内渗透物质含量密切相关。在中度胁迫下,XNT6-1 主要通过提高可溶性糖含量抵御其对植物的伤害,而在重度胁迫下 XNT6-1 主要通过提高可溶性蛋白以及脯氨酸含量来减轻伤害。植物体内活性氧产生与清除在正常情况下处于相对平衡状态,而在干旱胁迫时该平衡状态遭到破坏^[30],这严重影响了植物的生长发育。本试验中,也得到与前人基本相同的结论:未接菌幼苗体内抗氧化酶活性低于 PGPR 处理后植株体内酶活性。不同的是,接菌组幼苗体内仅 SOD 和 CAT 活性高于未接菌组,POD 含量却低于未接菌组。这可能是因为菌株 XNT6-1 主要通过增强植物体 SOD 和 CAT 这两种酶的表达来诱导其产生更高的防御性。综上可知,干旱胁迫的严重程度会直接影响小麦的生长情况,胁迫程度越高则小麦的生长情况越差,而 PGPR 菌株 XNT6-1 在一定程度上能够缓解干旱胁迫给植物带来的伤害。

4 结 论

在不同浓度 PEG-6000 模拟干旱情况下,XNT6-1 表现出良好耐旱能力,且该菌株具有产铁载体、淀粉酶、蛋白酶及脂酶等促生潜力。在一定程度的模拟干旱条件下,菌株 XNT6-1 浸种处理能够显著增加小麦种子萌发后的叶长、根长、鲜质量和干质量。通过称重法对盆栽试验的土壤含水量进行控制,发现促生菌 XNT6-1 的应用能够通过提高小麦叶片叶绿素含量、渗透物质含量以及抗氧化酶活性进而提高小麦幼苗抗旱能力。因此,本研究中的促生菌 XNT6-1 作为有潜力的菌种资源,有望在农业生产中发挥重要的抗逆作用。

参 考 文 献:

[1] ZHI J J, ZENG J, WANG Y Q, et al. A multi-omic resource of wheat seed tissues for nutrient deposition and improvement for human health [J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 269.

[2] HURA T. Wheat and barley: acclimatization to abiotic and biotic stress [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(19): 7423.

[3] EMRAN M, IBRAHIM O M, WALI A M, et al. Assessing soil quality, wheat crop yield, and water productivity under condition of deficit irrigation[J]. *Plants*, 2024, 13(11): 1462.

[4] RYU M, MISHRA R C, JEON J, et al. Drought-induced susceptibility for *Cenangium ferruginosum* leads to progression of *Cenangium*-dieback disease in *Pinus koraiensis* [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16368.

[5] KANYENJI G M, OLUOCH-KOSURA W, ONYANGO C M, et al. Prospects and constraints in smallholder farmers' adoption of multiple soil carbon enhancing practices in Western Kenya[J]. *Heliyon*, 2020, 6(3): e03226.

[6] 山仑. 我国旱地农业发展中的几个问题[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 2-4.

SHAN L. Issues in dryland agricultural research in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 2-4.

[7] SALLAM A, ALQUDAH A M, DAWOOD M F A, et al. Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(13): 3137.

[8] 葛晓兰, 杜久军, 张磊, 等. 胡杨 PeERF1 基因提高转基因银腺杨 84K 耐旱性研究[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(5): 83-90.

GE X L, DU J J, ZHANG L, et al. Improvement of drought tolerance of PeERF1 transgenic populus alba × populus glandulosa '84K' [J]. *Forest research*, 2023, 36(5): 83-90.

[9] 李龙, 毛新国, 王景一, 等. 小麦抗旱性研究进展与展望[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 11-20.

LI L, MAO X G, WANG J Y, et al. Progress and prospect of wheat research on drought resistance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 11-20.

[10] 马莹, 曹梦圆, 石孝均, 等. 植物促生菌的功能及在可持续农业中的应用[J]. *土壤学报*, 2023, 60(6): 1555-1568.

MA Y, CAO M Y, SHI X J, et al. Functions of plant growth-promoting bacteria and their application in sustainable agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1555-1568.

[11] 周益帆, 白霜霜, 岳童, 等. 植物根际促生菌促生特性研究进展[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(2): 644-666.

ZHOU Y F, BAI Y S, YUE T, et al. Research progress on the growth-promoting characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria [J]. *Microbiology (Reading, England)*, 2023, 50(2): 644-666.

[12] ZHU Y X, WANG Y, HE X L, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria: a good companion for heavy metal phytoremediation[J]. *Chemosphere*, 2023, 338: 139475.

[13] 温宏伟, 杨斌, 王东胜. 植物根际促生菌促进小麦生长及提高其抗旱性的研究进展[J]. *核农学报*, 2021, 35(9): 2194-2203.

WEN H W, YANG B, WANG D S. Research progress on promoting growth and drought resistance of wheat by plant growth promoting rhizobacteria[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(9): 2194-2203.

[14] 刘燕霞, 龙俊萌, 王静茹, 等. 五种漠境深色有隔内生真菌对小麦促生抗旱效应研究[J]. *中国科学(生命科学)*, 2021, 51(9): 1339-1349.

LIU Y X, LONG J M, WANG J R, et al. Effects of five dark septate endophytes isolated from deserts on growing wheat under drought stress[J]. *Science in China(Series C)*, 2021, 51(9): 1339-1349.

[15] 司春灿, 林英, 尚天玉. 油茶根际促生菌的筛选与促生特性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2024, 44(4): 28-35.

SI C C, LIN Y, SHANG T Y. Isolation and promoting characteristics of the rhizospheric bacteria of *Camellia oleifera* Abel [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, 44(4): 28-35.

[16] 杨红梅, 殷亚兰, 史应武, 等. 2 株耐热真菌的分离鉴定及其产酶活性研究[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(7): 1278-1283.

YANG H M, YIN Y L, SHI Y W, et al. Isolation, identification and enzyme activities of two thermotolerant fungi[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(7): 1278-1283.

[17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 62-174.

ZOU Q. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 62-174.

[18] 董萌, 施龙清, 解振兴, 等. 水稻根系内生固氮菌的分离鉴定及其促生作用研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 31-39.

DONG M, SHI L Q, XIE Z X, et al. Isolation, identification and growth promotion of endophytic nitrogen fixing bacteria from rice roots [J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2023, 51(1): 31-39.

[19] LI H P, HAN Q Q, LIU Q M, et al. Roles of phosphate-solubilizing bacteria in mediating soil legacy phosphorus availability[J]. *Microbiological Research*, 2023, 272: 127375.

[20] 李玉霞, 宋柳霞, 张雅琴, 等. 铁载体在环境污染与资源利用中的应用研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(6):

1330-1340.

LI Y X, SONG L T, ZHANG Y Q, et al. Review on the application of siderophores in environmental pollution and resource utilization[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45 (6): 1330-1340.

[21] 木尼热木·阿力木江, 楚敏, 唐琦勇, 等. 辐射污染区盐爪爪根际可培养细菌群落组成及功能特性[J]. 微生物学通报, 2018, 45 (7): 1416-1425.

ALIMUJIANG M, CHU M, TANG Q Y, et al. Community composition and functional characteristics of bacteria in the rhizosphere of *Kalidium foliatum* from the radiation polluted area[J]. Microbiology (Reading, England), 2018, 45(7): 1416-1425.

[22] 胡荣, 方琳琳, 付滕, 等. 淀粉酶高产菌的筛选、鉴定、诱变及生产优化[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2019, 43 (5): 496-500.

HU R, FANG L L, FU M, et al. The screening, identification, mutagenesis and production optimization of a bacteria with a high-level production of amylase [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(5): 496-500.

[23] 冉松. 产木质纤维素酶菌株的筛选应用及机理研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2023.

RAN S. Application and mechanism research of lignocellulolytic enzyme-producing strains [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2023.

[24] 韦鑫, 韦兴迪, 丁磊磊, 等. 高产铁载体菌对重金属胁迫下牧草种子萌发的影响[J]. 种子, 2023, 42(11): 16-22, 29.

WEI X, WEI X D, DING L L, et al. Effects of efficient siderophore-producing bacteria on germination of forage seeds under heavy metal stress[J]. Seed, 2023, 42(11): 16-22, 29.

[25] DIETZ K J, ZÖRB C, GEILFUS C M. Drought and crop yield[J]. Plant Biology, 2021, 23(6): 881-893.

[26] 彭亮, 杨冰月, 张岗, 等. 干旱胁迫对远志种子萌发及幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(4): 741-749.

PENG L, YANG B Y, ZHANG G, et al. Seed germination and seedling growth physiological characteristics of *polygala tenuifolia* willd. under drought stress [J]. Acta botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(4): 741-749.

[27] BANU S, YADAV P P. Chlorophyll: the ubiquitous photocatalyst of nature and its potential as an organo-photocatalyst in organic syntheses[J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2022, 20(44): 8584-8598.

[28] YANG T, MA S, DAI C C. Drought degree constrains the beneficial effects of a fungal endophyte on *Atractylodes lancea* [J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 117(5): 1435-1449.

[29] 李安, 舒健虹, 刘晓霞, 等. 干旱胁迫下枯草芽孢杆菌对玉米苗期叶片的生理生化调节[J]. 西北农业学报, 2023, 32 (12): 1964-1977.

LI A, SHU J H, LIU X X, et al. Physiological and biochemical regulation of *Bacillus subtilis* spores on leaves at seedling stage of maize under drought stress [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2023, 32(12): 1964-1977.

[30] 刘燕, 张凌楠, 刘晓宏, 等. 干旱胁迫植物个体生理响应及其生态模型预测研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10042-10053.

LIU Y, ZHANG L N, LIU X H, et al. Research progress from individual plant physiological response to ecological model prediction under drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (24): 10042-10053.

(上接第 53 页)

[26] ALBASSAM B A. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress [J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24(9): 1325-1335.

[27] FLORES P, CARVAJAL M, CERDÁ A, et al. Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites [J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24 (10): 1561-1573.

[28] VILLA-CASTORENA M, ULERY A L, CATALÁN-VALENCIA E A, et al. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of Chile pepper plants [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1781-1789.

[29] FAROOQ M, HUSSAIN M, WAKEEL A, et al. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 461-481.

[30] JAN A U, HADI F, MIDRARULLAH, et al. Potassium and zinc increase tolerance to salt stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 116: 139-149.

[31] LIU J F, ZHANG S L, TANG H L, et al. Overexpression of an aelu-ropuslittoralis Parl. potassium transporter gene, *AlHAK1*, in cotton enhances potassium uptake and salt tolerance[J]. Euphytica, 2015, 203(1): 197-209.

[32] SHENKER M, BEN G A, SHANI U. Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses[J]. Plant and Soil, 2003, 256(1): 139-147.

[33] JIA J, HUANG C, BAI J H, et al. Effects of drought and salt stresses on growth characteristics of euhalophyte *Suaeda salsa* in coastal wetlands[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2018, 103: 68-74.

[34] 张允昔, 陈宜, 崔爱花, 等. 不同施氮量对棉花产量和氮肥利用率的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014, (6): 1202-1206.

Y X, CHEN Y, CUI A H, et al. The effects of different nitrogen application rates on cotton yield and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2014, (6): 1202-1206.