

干旱胁迫下两种芽胞杆菌对 玉米幼苗促生作用研究

刘婕¹, 骆文琪¹, 明立伟^{1,2}, 马璐¹, 齐翔鲲¹,
付健^{1,2}, 杨克军^{1,2}, 王玉凤^{1,2,3}

(1.黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江大庆163319; 2.黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,
黑龙江大庆163319; 3.东北林业大学东北盐碱植被恢复与重建教育部重点实验室,黑龙江大庆163319)

摘要: 供试玉米品种为‘先玉335’(XY335), 供试菌株为 NECC11322 (*Bacillus subtilis*) 枯草芽胞杆菌、NECC11324 (*B. megaterium*) 巨大芽胞杆菌。试验设4组处理: Con(无菌水浸种, 干旱胁迫), C1(无菌水浸种, 正常供水), C2(NECC11322 菌液浸种, 干旱胁迫), C3(NECC11324 菌液浸种, 干旱胁迫), 测定了浸种后盆栽玉米幼苗的生长状况、抗性生理指标及植株的 N、P、K 含量。结果表明: 在干旱胁迫下接种 NECC11322、NECC11324 后, 玉米幼苗叶片及根系 SOD、POD、CAT、APX 活性较 Con 均不同程度升高, 其中接种 NECC11322 根系 POD 活性增长最为显著, 较 Con 增长 67.78%; 植株叶片及根系可溶性蛋白含量、可溶性糖含量较 Con 均呈上升趋势, 其中接种 NECC11322 叶片可溶性糖含量增长最为显著, 较 Con 增长 152.10%; 与 Con 相比, 植株叶片及根系全氮、全磷、全钾养分含量均有所提升, 接种 NECC11322 后叶片全氮含量升高最为显著, 较 Con 增长 88.47%; 干旱胁迫下接种两种芽胞杆菌后, 植株叶片及根系丙二醛含量较 Con 均显著降低, 接种 NECC11322 后根系降幅最为显著, 较 Con 降低 51.03%。综上可知, 干旱胁迫下接种两种芽胞杆菌均可降低干旱胁迫对玉米幼苗生长的抑制, 其中 NECC11322 菌株更具有抗旱性。通过提高保护酶活性、可溶性蛋白、可溶性糖含量、叶绿素含量以及植株养分含量提高玉米幼苗抗旱性, 促进玉米幼苗生长。

关键词: 芽胞杆菌; 浸种; 玉米幼苗; 干旱胁迫; 促生作用

中图分类号: S513 **文献标志码:** A

Growth promotion effects of two *Bacillus* species on maize seedlings under drought stress

LIU Jie¹, LUO Wenqi¹, MING Liwei^{1,2}, MA Lu¹, QI Xiangkun¹,
FU Jian^{1,2}, YANG Kejun^{1,2}, WANG Yufeng^{1,2,3}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement of Heilongjiang Province
Daqing, Heilongjiang 163319, China; 3. Key Laboratory of Saline-alkali Vegetation Ecology Restoration,
Ministry of Education (Northeast Forestry University), Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: This experiment used corn variety XY335 and bacterial strains NECC11322 (*Bacillus subtilis*) and NECC11324 (*B. megaterium*). Four treatments were established: Con (sterile water soaking, drought stress), C1 (sterile water soaking, normal watering), C2 (NECC11322 bacterial liquid soaking, drought stress), and C3 (NECC11324 bacterial liquid soaking, drought stress). The growth status, resistance physiological indicators, and N, P, and K content of potted maize seedlings after soaking were measured. The results showed that under drought stress, the activities of SOD, POD, CAT, and APX in the leaves and roots of maize seedlings increased to varying degrees compared to Con after inoculation with NECC11322 and NECC11324. Among them, the POD activity in the roots of maize seedlings increased most significantly after inoculation with NECC11322, with an increase of 67.78%

收稿日期:2023-09-12

修回日期:2023-12-06

基金项目: 东北盐碱植被恢复与重建教育部重点实验室(东北林业大学)开放基金(0924210202); 黑龙江省外向型农业产业技术体系项目(2023); 黑龙江八一农垦大学试验示范基地项目-鲜食玉米绿色丰产增效栽培技术集成与示范(2023)

作者简介: 刘婕(1998-), 女, 黑龙江七台河人, 硕士研究生, 研究方向为玉米高产理论与逆境生理生态。E-mail: 25139134741@qq.com

通信作者: 王玉凤(1978-), 女, 山东潍坊人, 副教授, 主要从事玉米高产栽培与逆境生理生态研究。E-mail: wangyufeng0918@168.com

compared to Con. The content of soluble protein and soluble sugar in plant leaves and roots showed an increasing trend compared to Con, with the soluble sugar content in leaves inoculated with NECC11322 showing the most significant increase, increasing by 152.10% compared to Con. Compared with Con, the total nitrogen, total phosphorus, and total potassium nutrient content in plant leaves and roots were all increased. After inoculation with NECC11322, the total nitrogen content in leaves increased most significantly, with an increase of 88.47% compared to Con. Under drought stress, after inoculation with two types of *Bacillus*, the content of malondialdehyde in plant leaves and roots significantly decreased compared to Con. After inoculation with NECC11322, the root system showed the most significant decrease, which was 51.03% lower than Con. In summary, inoculating two types of *Bacillus subtilis* under drought stress reduced the inhibition of drought stress on the growth of maize seedlings, with NECC11322 strain being more drought resistant. By increasing the activity of protective enzymes, soluble protein, soluble sugar content, chlorophyll content, and plant nutrient content, the drought resistance of maize seedlings were improved, promoting their growth.

Keywords: *Bacillus*; seed soaking; corn seedlings; drought stress; growth promotion

玉米 (*Zea mays* L.) 是禾本科一年生草本植物, 是我国第一大粮食作物, 生育期较长, 水肥需求量较大, 对干旱胁迫较为敏感^[1]。在全球气候变暖的情况下, 地表温度不断升高, 气温波动幅度增强。研究表明, 干旱胁迫明显降低玉米叶片叶绿素含量, 且对叶绿素含量的影响随干旱程度的增强和干旱时间的持续而增大^[2]。王萌等^[3]研究表明, 在轻微干旱胁迫下, 植株受到逆境胁迫会激发体内的保护机制从而使 SOD、POD、APX 活性呈上升趋势, 而在中度干旱胁迫后, SOD、POD、APX 活性会呈现下降趋势导致植株保护酶系统受到损伤从而影响植株生长。杨阳等^[4]研究表明, 在干旱试验区, 玉米拔节~灌浆期的生长被显著抑制, 且在不同干旱程度下叶绿素含量均显著降低。马旭凤等^[5]研究表明, 苗期干旱会抑制玉米植株生长, 导致其生育期出现延迟。

芽胞杆菌 (*Bacillus*) 是一种具有生防潜力的促生菌, 可以广泛定殖于植物体内, 并且占据有利的生态地位, 可作为植物的益生菌促进植物生长。刘拴成等^[6]研究表明, 利用解淀粉芽胞杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*) B9601-Y2 进行拌种、浸种、土壤灌溉均可显著促进玉米生长量及经济学产量。有田间试验表明^[7], 施用巨大芽胞杆菌菌剂可以显著增加玉米植株茎、叶以及根系干质量 70% 以上, 进而促进玉米增产 10%。

芽胞杆菌也被应用于作物抗盐碱、耐低温等非生物胁迫试验中, 均表现出良好的效果, 但芽胞杆菌被应用于干旱胁迫的试验鲜有报道。在当今全球变暖、旱灾时有发生的环境下, 为了能更好应对干旱胁迫导致玉米苗期弱苗现象以及最终减产, 本试验将两种不同芽胞杆菌定殖于玉米种子并进行

盆栽试验, 探讨芽胞杆菌在干旱胁迫下对玉米的保护机制, 为玉米实际生产提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年 6—9 月在黑龙江八一农垦大学农学院进行盆栽种植, 选用玉米种子‘先玉 335’为供试材料, 选择具有固氮、产 IAA、解磷、产蛋白酶的 NECC11322 (*Bacillus subtilis*) 枯草芽胞杆菌、NECC11324 (*B. megaterium*) 巨大芽胞杆菌为供试菌株, 供试菌株为本实验室前期筛选所得。

1.2 试验方法

1.2.1 菌种的活化与扩繁 活化 LB 培养基: 蛋白胨 10 g, 酵母提取物 5 g, NaCl 10 g, 蒸馏水 1 L, pH 值 7.0~7.2。将保藏于-80℃冰箱中的菌株取出活化并进行发酵, 发酵菌液浓度为 1×10^7 cfu · mL⁻¹。

1.2.2 浸种催芽 选取大小一致、外观无破损的玉米种子 (发芽率 > 90%), 先浸泡于 10% NaClO 溶液中 10 min, 再用无菌水清洗玉米种子 3~5 次后浸种 8 h。浸种完成后, 将其排列在铺有无菌吸水纸的发芽盒中, 每盒 40 粒, 放置恒温气候箱暗黑培养 3 d, 温度 25℃。

1.2.3 盆栽种植 待种子催芽完成后, 选取长势一致、芽长 $1.5 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$ 的玉米种子进行盆栽种植, 盆栽土壤每盆重量为 700 g, 供试土壤 pH 值 6.85, 有机质 $30.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $128.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $58.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $218.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每盆栽种 5 棵玉米, 每个处理进行 5 次重复。盆栽培养条件为每天光照 8 h, 日间温度为 25~27℃, 夜间温度为 20~22℃。盆栽种植后, 每 2 d 浇水 1 次, 浇水量为每盆 50 mL。设置一组空白对照 (C1: 无菌水

浸种、正常供水),各处理分别标记为 C2(NECC11322 菌液浸种、干旱胁迫)、C3(NECC11324 菌液浸种、干旱胁迫),Con(无菌水浸种、干旱胁迫)。盆栽种植前一天进行芽胞杆菌定殖,浓度为 1×10^7 cfu · mL⁻¹,每盆施液量为 100 mL。待玉米幼苗长至三叶一心时,Con、C2、C3 停止浇水,进行自然干旱,C1 正常供水。

1.2.4 取样 待玉米幼苗长至三叶一心时停止浇水进行自然干旱 3~5 d,温室培养条件为日间温度 25~27℃,夜间温度 20~22℃。采用称重法控制土壤含水量,在土壤含水量相当于田间最大持水量的 40%~50%时取样,每组处理取 5 株幼苗用于形态指标及植株生物量测定,取 10 株幼苗拆分叶片与根系,用液氮处理后放置 -80℃ 冰箱中用于抗氧化酶、渗透调节物质含量的测定,另取 5 株拆分地上部分与地下部分,105℃ 烘箱杀青,80℃ 烘干至恒重用于植株养分含量测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 玉米幼苗形态指标测定 植株表型测量:株高使用直尺测量,茎粗使用游标卡尺测量;植株生物量使用上海精其仪器有限公司 JA2103N 千分之一电子分析天平称烘干样品干质量,干质量取 5 株植株平均值。

1.3.2 菌株抗旱性测定 利用 PEG-6000 人工模拟干旱条件^[8],将 NECC11322 及 NECC11324 菌株活化后接种于含有不同浓度 PEG-6000 的 LB 培养基中,于 37℃,180 r · min⁻¹ 震荡培养 3 d,检测培养液光密度值(OD_{600}),分析菌株在不同浓度 PEG-6000 中的生长情况^[9]。

1.3.3 玉米幼苗生理指标测定 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法^[10]测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[10]测定,过氧化氢酶

(CAT)活性采用紫外吸收方法^[10]测定,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用比色法^[10]测定,光合色素含量采用 95%乙醇提取-分光光度法测定,可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝法^[11]测定,可溶性糖含量采用蒽酮法^[12]测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[13]测定。植株养分含量测定方法采用鲍士坦的方法^[14]测定。

1.4 数据统计分析

试验所得数据采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理,Origin 2021 进行绘图,利用 SPSS 21.0 数据处理软件进行统计分析 & 差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 菌株抗旱能力分析

如图 1 所示,将两株菌株接种于含有不同浓度 PEG-6000 的 LB 培养基中,振荡培养 1~3 d,分别观察两株菌株在 24 h、48 h、72 h 的不同变化。可以看出,在不同时间点的相同 PEG-6000 浓度下两株菌株 OD 值呈上升趋势, OD 值升高说明菌株菌落数及浓度均有所增加,两株菌株均生长良好。在 72 h,PEG-6000 浓度在 40%~50%时,NECC1134 菌株 OD 值骤降生长受到较大抑制。由此可以看出,两株菌株均有较好的抗旱能力,且 NECC11322 高于 NECC11324。

2.2 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗生长发育的影响

由表 1 可以看出,在接种 NECC11322 后,C2 处理植株株高、茎粗、地上部分及地下部分干质量、根冠比较 Con 处理分别增长 34.35%、42.59%、52.72%、73.25%、13.45%,C2 处理株高、茎粗与地上部分干质量较 Con 呈显著性差异;接种 NECC11324 后,C3 处理植株株高、茎粗、地上部分及地下部分干

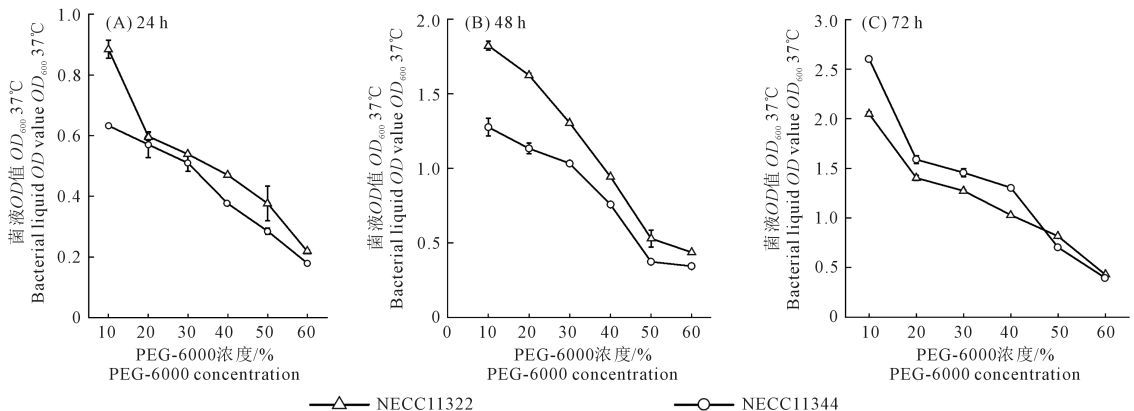


图 1 不同浓度 PEG-6000 中菌株生长情况

Fig.1 Growth of strains in PEG-6000 with different concentrations

质量、根冠比较 Con 处理分别增长 21.55%、42.15%、15.63%、27.54%、10.30%，C3 处理较 Con 相比差异显著。由图 2 植株表型图片可以看出，C1、C2、C3 处理植株及根系长势显著高于 Con，且 C2、C3 处理的植株及根系长势均显著高于 C1。由此可知，在干旱胁迫下，接种芽胞杆菌能够显著提升玉米幼苗的株高、茎粗以及干质量、根冠比，并促进幼苗生长。

2.3 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗叶片光合色素含量的影响

如图 3 所示，在干旱胁迫下，接种 NECC11322 后，C2 处理与 Con 相比，植株叶片叶绿素 a、叶绿素

b、类胡萝卜素以及叶绿素总含量增幅 28.78% ~ 86.54%，C2 处理相比 Con 差异显著；C2 处理与 C1 相比，玉米幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素以及叶绿素总含量呈增幅在 20.65% ~ 36.95%。接种 NECC11324 后，C3 处理植株叶片叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素以及叶绿素总含量与 Con 相比增幅为 17.43% ~ 73.98%，C3 处理与 Con 相比差异显著；C3 处理与 C1 相比，株叶片叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素以及叶绿素总含量增幅为 12.5% ~ 24.2%。综上可知，接种芽胞杆菌能够显著提高玉米幼苗光合色素含量，保持玉米幼苗的持绿能力。

表 1 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗生长发育的影响

Table 1 Effects of *Bacillus* on growth and development of maize seedlings under drought stress

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem thickness	地上部分干质量/mg Shoot dry mass	地下部分干质量/mg Root dry mass	根冠比/% Root shoot ratio
Con	26.30±2.21c	2.27±0.01b	110.5±15.7b	28.1±2.7b	30.24a
C1	30.40±1.02bc	3.20±0.02a	117.1±36.5ab	33.4±2.4ab	24.03a
C2	35.33±3.41a	3.24±0.04a	168.7±18.1a	57.9±8.6a	34.30a
C3	31.97±1.97ab	3.23±0.07a	127.7±31.1ab	42.6±3.1b	33.35a

注：表中数据为“均值±标准差”，同列数据后不同字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平下差异显著。

Note: The values are represented as “mean ± standard deviation”. Different letters indicate significant differences between treatments at the $P<0.05$ level.

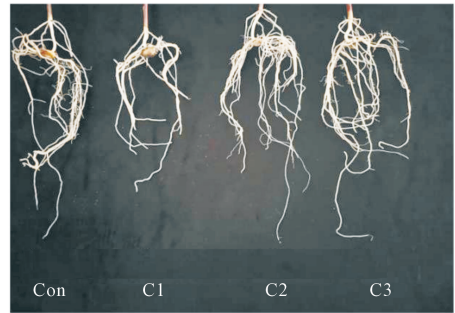
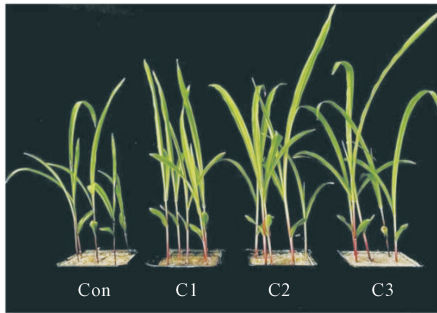
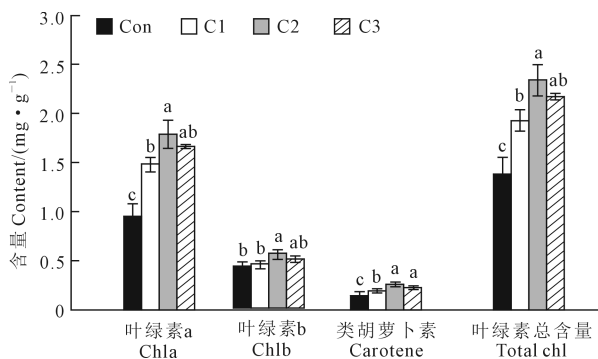


图 2 接种芽胞杆菌对植株地上部分及地下部分表型影响

Fig.2 Effects of *Bacillus* inoculation on phenotypes of aboveground and underground parts of plants



注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the $P<0.05$ level. The same below.

图 3 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗叶片叶绿体色素含量的影响

Fig.3 Effects of *Bacillus* on chloroplast pigment content in maize seedling leaves under drought stress

2.4 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

如图 4 所示，在干旱胁迫下，施用芽胞杆菌使植株叶片以及根系 SOD、POD、CAT、APX 活性均显著提高。如图 4A 所示，接种 NECC11322 后：C2 处理植株叶片 SOD、POD、CAT、APX 活性较 Con 增幅 52.39% ~ 67.75%，C2 处理与 Con 相比呈显著性差异；C2 处理叶片 SOD、POD、CAT、APX 活性与 C1 处理相比增幅 63.21% ~ 95.83%，C2 处理与 C1 处理相比差异显著；接种 NECC11324 后：C3 处理植株叶片 SOD、POD、CAT、APX 活性较 Con 相比增幅 10.02% ~ 41.10%，其中 SOD、APX 活性与 Con 相比差异不显著；C3 处理与 C1 处理相比，植株叶片 SOD、POD、CAT、APX 活性增幅 34.53% ~ 56.23%，C3 处理与 C1

处理相比差异显著;如图 4B 所示,接种 NECC11322 后:C2 处理与 Con 相比根系 SOD、POD、CAT、APX 活性增幅 15.17%~67.78%,C2 处理与 Con 相比呈显著性差异;C2 处理根系 SOD、POD、CAT、APX 活性与 C1 相比增幅 47.19%~84.90%,C2 处理与 C1 处理相比差异显著。接种 NECC11324 后:C3 处理根系 SOD、POD、CAT、APX 活性较 Con 相比增幅 5.41%~46.81%,其中 POD、CAT 与 Con 相比差异显著;C3 处理根系 SOD、POD、CAT、APX 活性较 C1 处理相比增幅 34.71%~61.80%,C3 处理与 C1 处理差异显著。综上可知,干旱胁迫下接种芽胞杆菌,植株叶片及根系 SOD、POD、CAT、APX 活性显著升高,缓解干旱胁迫对玉米幼苗的伤害。

2.5 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗渗透调节物质含量的影响

如图 5A 所示,在干旱条件下,与 C1 处理相比,Con 植株叶片及根系可溶性蛋白含量分别减少 31.84%、15.32%。在干旱胁迫下接种 NECC11322,

与 Con 相比,C2 处理植株叶片以及根系可溶性蛋白含量分别上升 59.33%、39.34%,C2 处理与 C1 处理相比分别上升 20.85%、20.83%,C2 处理与 Con 及 C1 处理相比均差异显著;接种 NECC11324 后,C3 处理与 Con 相比,植株叶片以及根系可溶性蛋白含量较 Con 分别上升 38.80%、28.24%,C3 处理与 C1 处理相比分别上升 5.28%、11.21%。如图 5B 所示,接种 NECC11322 后,C2 处理植株叶片及根系可溶性糖含量较 Con 相比分别增长 152.10%、105.78%;C2 处理与 C1 处理相比,植株叶片及根系可溶性糖含量分别增长 70.07%、48.16%,C2 处理与 Con 及 C1 处理相比均差异显著。接种 NECC11324 后,C3 处理植株叶片及根系可溶性糖含量较 Con 相比分别增长 128.94%、88.02%;C3 处理与 C1 处理相比,植株叶片及根系可溶性糖含量分别增长 54.44%、35.37%,C3 处理与 Con 及 C1 处理相比均差异显著。综上所述,接种芽胞杆菌可显著增加玉米幼苗可溶性蛋白及可溶性糖含量。

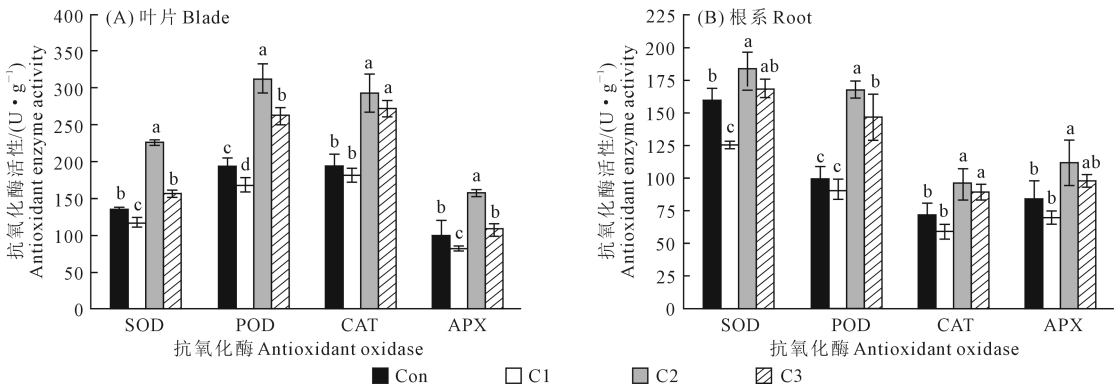


图 4 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effect of *Bacillus* on antioxidant oxidase activity of maize seedlings under drought stress

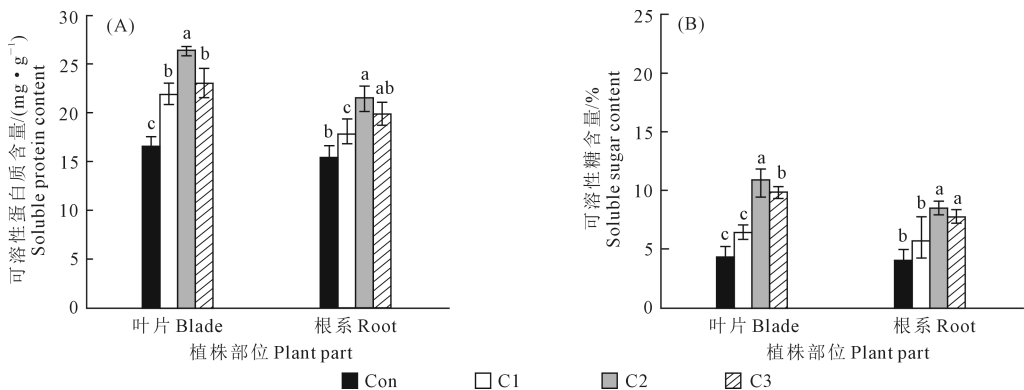


图 5 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig.5 Effects of *Bacillus* on osmotic regulatory substances contents in maize seedlings under drought stress

2.6 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗丙二醛含量的影响

如图 6 所示, Con 与 C1 处理相比, 植株叶片及根系 MDA 含量分别升高 60.39%、99.94%。接种 NECC11322 后, C2 处理植株叶片及根系丙二醛含量较 Con 相比分别降低 46.50%、51.03%, C2 处理与 Con 相比差异显著; 接种 NECC11324 后, C3 处理叶片及根系丙二醛含量较 Con 相比分别降低 41.81%、40.83%, C3 处理与 Con 相比差异显著; 表明在干旱胁迫下, 未接种菌株的玉米幼苗丙二醛含量显著上升; 在接种芽胞杆菌后玉米幼苗植株丙二醛含量明显下降, 说明接种芽胞杆菌可以显著缓解干旱胁迫所造成的丙二醛含量的提升。

2.7 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗植株养分含量的影响

如图 7A 所示接种 NECC11322 后, C2 处理与 Con 相比, 植株叶片全氮、全磷、全钾含量增幅 52.09%~88.47%; C2 处理与 C1 处理相比, 植株叶片全氮、全磷、全钾含量增幅 24.22%~67.67%, C2 处理植株养分含量较 Con 与 C1 处理相比均差异显著; 接种 NECC11324 后, C3 处理与 Con 相比, 植株叶片全氮、全磷、全钾含量增幅 24.46%~69.86%, C3 处理与 C1 处理相比, 植株叶片全氮、全磷、全钾含量增幅 17.93%~42.88%, C3 植株养分含量较 Con 及 C1 处理相比均差异显著; 如图 7B 所示, 接种 NECC11322

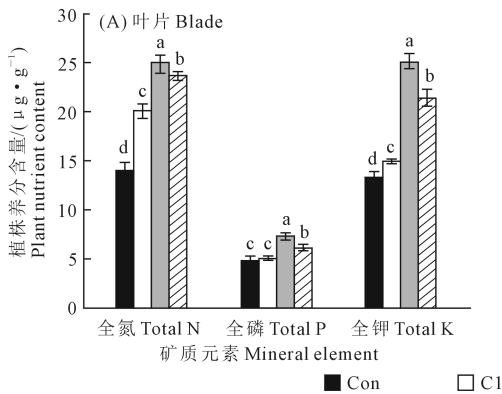


图 7 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗植株养分含量的影响

Fig.7 Effects of *Bacillus* on nutrient content of maize seedlings under drought stress

3 讨论

3.1 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗生长的影响

玉米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^[15]。因此, 缓解玉米苗期干旱胁迫是提高玉米产量与质量的重要途径。雷先德等^[16]研究表明, 复合微生物菌剂 *Paenibacillus mucilaginosus* 和 *Bacillus subtilis* 促进菠菜的生长。

后, C2 处理较 Con 相比植株根系全氮、全磷、全钾含量增幅 48.31%~83.18%, C2 处理与 C1 处理相比根系全氮、全磷、全钾含量增幅 46.42%~51.45%, C2 处理植株养分含量较 Con 及 C1 处理相比均差异显著; C3 处理较 Con 相比植株根系全氮、全磷、全钾含量增幅 30.43%~48.31%, C3 处理较 C1 处理相比植株根系全氮、全磷、全钾含量增幅 9.61%~24.86%, C3 处理植株根系养分含量较 Con 及 C1 处理相比均差异显著。结果表明, 未接种芽胞杆菌植株受干旱胁迫影响导致植株养分含量显著下降, 通过接种芽胞杆菌可以显著提升干旱胁迫下植株的养分含量, 促进幼苗生长。

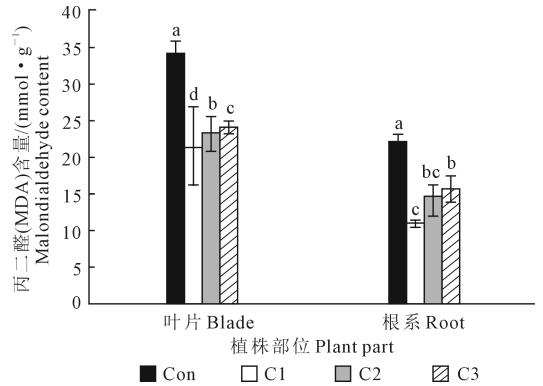
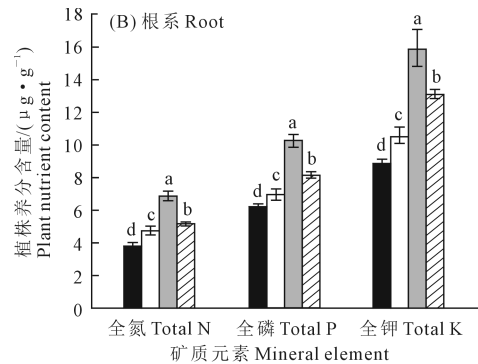


图 6 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗丙二醛含量的影响

Fig.6 Effects of *Bacillus* on malondialdehyde content in maize seedlings under drought stress



Siddikee 等^[17]在油菜接种芽胞杆菌的试验中发现, 接种阿氏芽胞杆菌 RS341 可以使根长增加 40%, 在玉米盆栽和田间试验接种芽胞杆菌进行验证, 结果均证实阿氏芽胞杆菌 RS341 有促进植株生长的效果。在本试验中, 干旱胁迫下玉米幼苗生长明显受到抑制。在土壤中定殖芽胞杆菌处理后, 玉米幼苗的株高、茎粗、地上部及地下部分干质量、根冠比均显著提高, 与前人研究结果一致。芽胞杆菌能够促

进干旱胁迫下玉米幼苗的生长,这可能是由于两株芽胞杆菌均具有产 IAA、固氮、解磷的功能。

3.2 芽胞杆菌对干旱胁迫下植株光合色素含量的影响

光合作用是植物形成有机物的重要生理过程,叶绿素是光合作用中吸收光能的主要色素^[18]。光合色素是植物进行光合作用必不可少的物质,有研究表明,在干旱条件下,植物体内光合色素的含量会减少,从而减弱植物的光合作用^[19]。敖远等^[20]研究表明,接种适量浓度芽胞杆菌可以显著提高番茄叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量。王丹等^[21]在对滇重楼叶片的试验中得出,分别接种 3 种不同芽胞杆菌均能不同程度提升叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量。本试验中,在干旱胁迫下接种芽胞杆菌,玉米幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量显著提升,植株叶片持绿性有所提升。其原因可能是本试验中两种芽胞杆菌均有解磷能力,芽胞杆菌将无机磷转化为可吸收的磷元素,磷元素会增加植株的光合作用,以此提高植株叶片的叶绿素以及类胡萝卜素含量。这与 Chen 等^[22]在玉米盐胁迫下添加解淀粉芽胞杆菌 SQR9 使植株中叶绿素含量显著升高、增加植株光合能力的试验结论基本一致。

3.3 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗生理生化特性的影响

在干旱胁迫下植物体内抗氧化酶活性均会呈现不同程度的上升^[23-24]。Panwar 等^[25]研究表明,在盐胁迫下,绿豆接种蜡样芽胞杆菌 (*B. cereus* PSB3) 后,植株中 SOD、POD 活性显著提升,减少 ROS 造成的膜损伤。Chen 等^[26]研究发现,富含多种芽胞杆菌的生物肥料能显著提升草莓的 SOD、POD、CAT 活性,显著增加根际有益菌种类,并对防治草莓枯萎病有显著成效。本试验中,干旱胁迫下接种芽胞杆菌的玉米幼苗叶片及根系 SOD、POD、CAT、APX 活性均不同程度上升。说明在干旱胁迫下,芽胞杆菌促进玉米幼苗叶片及根系保护酶系统的激活,使保护酶活性有所提高,诱导逆境胁迫中玉米幼苗产生生理抗性反应,使体内活性氧自由基的产生与清除达到平衡。这与前人在玉米及小麦上的研究结果基本一致^[27-28]。

在干旱胁迫下,渗透调节物质的变化是影响植物抵抗胁迫的主要因素之一,包括可溶性糖、可溶性蛋白含量的变化,能调节自身渗透能力、降低渗透势、降低水势、维持细胞膨压、减轻干旱胁迫引起的损伤^[29]。施燕华^[30]研究表明,在不同程度干旱

胁迫下接种巨大芽胞杆菌,可增加紫花苜蓿幼苗叶片和根部可溶性糖和可溶性蛋白质的含量,有效维持细胞渗透势平衡,防止植物失水,以防御干旱胁迫。本试验测定了干旱胁迫下接种芽胞杆菌后植株可溶性蛋白和可溶性糖含量的变化,试验结果表明,接种芽胞杆菌后,植株叶片及根系可溶性蛋白、可溶性糖的含量明显上升,但不同指标间的增幅有所差异。

在干旱条件下,植株会产生大量活性氧,增加膜脂过氧化反应^[31]。Azeem 等^[32]研究表明,在盐胁迫下添加芽胞杆菌 PM25 显著提高了玉米植株的抗氧化酶活性,降低了 MDA 含量。芽胞杆菌可以通过激活植物体内抗氧化酶和相关抗病蛋白,降低植物丙二醛含量来减轻干旱胁迫引起的氧化损伤,进而达到提高植物抗逆性的目的。在本试验中,干旱胁迫下玉米幼苗 MDA 含量显著增加,说明干旱对玉米幼苗细胞膜系统的损伤导致细胞膜脂质过氧化产物 MDA 含量增加。在干旱条件下接种 NECC11322、NECC11324 玉米幼苗 MDA 含量较 Con 明显降低,说明接种芽胞杆菌能显著降低玉米幼苗中 MDA 含量,减少活性氧积累,减轻干旱胁迫对玉米幼苗造成的损伤。由此可以进一步证明,芽胞杆菌可以通过调节植物体内生理生化反应直接提高其抵抗干旱胁迫的能力^[33]。

3.4 芽胞杆菌对干旱胁迫下玉米幼苗 N、P、K 含量的影响

氮被称为生命元素,是叶绿体、部分蛋白质以及磷脂等物质的重要组成部分。磷是第二大营养生长元素,是细胞质及细胞核的组成部分,也是一些重要酶的组成部分,磷主要以磷酸根的形式存在于土壤中,有利于植株对磷元素的吸收,磷的含量也是影响光合作用及呼吸作用的因素之一。植物体内糖类的形成和运输与钾含量密切相关,钾有利于促进氮代谢,提高植物抗性^[34]。刘晔等^[35]从花生根际土壤筛选到的弯曲芽胞杆菌 (*Bacillus flexus*),具有溶磷、固氮、解钾、合成 IAA 的功能,接种菌株后,可显著提高花生植株 N、P、K 含量,显著提高植株的株高、鲜质量。王琰^[7]研究表明,在两次盆栽试验中,在玉米苗周围浇施具有产 IAA、产蛋白酶、解磷的巨大芽胞杆菌及阿氏芽胞杆菌,均能显著提升玉米幼苗 N、P、K 含量,从而促进玉米幼苗生长。在本试验中,在干旱胁迫下玉米幼苗 N、P、K 含量均有所下降,接种芽胞杆菌 NECC11322、NECC11324 后,玉米幼苗 N、P、K 含量显著上升,试验结果表明接种芽胞杆菌能增加植株 N、P、K 含量,

从而促进玉米幼苗生长。

4 结 论

在不同浓度 PEG-6000 模拟干旱情况下,两株菌株均表现出良好耐旱能力,且在持续 72 h 干旱培养条件下,NECC11322 耐旱能力优于 NECC11324。在干旱胁迫下,接种具有固氮、解磷、产 IAA、产蛋白酶功能的芽胞杆菌 NECC11322、NECC11324,均能显著促进玉米幼苗生长,提升玉米幼苗抗氧化酶活性,提高植株营养元素 N、P、K 含量;接种 NECC11322、NECC11324 可增加玉米幼苗渗透调节物质的积累,维持渗透调节平衡,提升玉米幼苗叶片光合色素含量,从而提升叶片光合作用能力。本试验结果表明 NECC11322、NECC11324 均能提高玉米幼苗抗旱能力,降低干旱胁迫为玉米幼苗造成的伤害,证明芽胞杆菌可用于干旱胁迫下玉米栽培实践。

参 考 文 献:

- [1] 李琬婷, 宁朋, 王菲, 等. 外源脱落酸对干旱胁迫下滇润楠幼苗生长及生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1543-1550. LI W T, NING P, WANG F, et al. Effects of exogenous abscisic acid (ABA) on growth and physiological characteristics of *Machilus yunnanensis* seedlings under drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1543-1550.
- [2] 宋贺, 蒋延玲, 许振柱, 等. 玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2405-2415. SONG H, JIANG Y L, XU Z Z, et al. Response of photosynthetic physiological parameters of maize to drought during the whole growth period and after the jointing stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2405-2415.
- [3] 李萌, 陆欣春, 田霄鸿, 等. 干旱条件下锌对玉米根系生长及叶片保护酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 109-114. LI M, LU X C, TIAN X H, et al. Effect of zinc on the growth of maize roots and activity of the protective enzyme of maize leaves under the drought conditions[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2009, 37(10): 109-114.
- [4] 杨阳, 齐月, 赵鸿, 等. 水分胁迫对干旱半干旱区玉米关键生育期生长发育及产量的影响及评价[J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 1059-1067. YANG Y, QI Y, ZHAO H, et al. Effects and evaluations of water stress on growth development and yield of maize during critical growth periods in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1059-1067.
- [5] 马旭凤, 于涛, 汪李宏, 等. 苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1731-1736. MA X F, YU T, WANG L H, et al. Effects of water deficit at seedling stage on maize root development and anatomical structure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1731-1736.
- [6] 刘拴成, 杨进成, 马丽华, 等. 解淀粉芽孢杆菌 B9601-Y2 提高玉米生长和产量的效应[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 78-82, 85.

- LIU S C, YANG J C, MA L H, et al. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* B9601-Y2 on growth and yield promotion of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6): 78-82, 85.
- [7] 王琰. 解磷芽孢杆菌的筛选鉴定及其对玉米促生理机理的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016. WANG Y. Study on isolation of phosphate-solubilizing bacillus and their impact of growth-promoting for maize [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [8] MARULANDA A, BAREA J M, AZCÓN R. Stimulation of plant growth and drought tolerance by native microorganisms (AM fungi and bacteria) from dry environments: mechanisms related to bacterial effectiveness[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2009, 28(2): 115-124.
- [9] 张彦涛, 生吉萍, 葛佳, 等. 旱生植物内生细菌的分离及耐旱菌株的筛选鉴定[J]. 食品科学, 2012, 33(5): 124-128. ZHANG Y T, SHENG J P, GE J, et al. Isolation and identification of drought-tolerant bacteria from xerophytes[J]. Food Science, 2012, 33(5): 124-128.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-165. LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-165.
- [11] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 131-135. ZOU Q. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 131-135.
- [12] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 303. Shanghai Institute of Plant Physiology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Society of Plant Physiology. Guidelines for modern plant physiology experiments [M]. Beijing: Science Press, 1999: 303.
- [13] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 119-124. CHEN J X, WANG X F. Experimental guidance of plant physiology [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 119-124.
- [14] 鲍士旦. 土壤化学分析: 土壤农业化学资源与环境专业用[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-271. BAO S D. Soil agrochemical analysis: professional use of soil agrochemical resources and environment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 264-271.
- [15] 宋利兵, 姚宁, 冯浩, 等. 不同生育阶段受旱对旱区夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 63-73. SONG L B, YAO N, FENG H, et al. Effects of drought at different growth stages on growth, development and yield of summer maize in arid regions[J]. Journal of Maize Science, 2016, 24(1): 63-73.
- [16] 雷先德, 李金文, 徐秀玲, 等. 微生物菌剂对菠菜生长特性及土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 488-494. LEI X D, LI J W, XU X L, et al. Effect of microbial inoculants on spinach growth characteristics and soil microbial diversity [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012, 20(4): 488-494.
- [17] SIDDIKIEE M A, CHAUHAN P S, ANANDHAM R, et al. Erratum to: isolation, characterization, and use for plant growth promotion un-

- der salt stress, of ACC deaminase-producing halotolerant bacteria derived from coastal soil[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2017, 27(19): 1724-1724.
- [18] 王鹏, 王铁兵, 王瑞, 等. 外源 5-氨基乙酰丙酸对干旱胁迫下玉米幼苗生理特性及抗氧化酶基因表达的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(1): 75-81.
- WANG P, WANG T B, WANG R, et al. Effects of exogenous 5-ALA on physiological characteristics and antioxidant enzyme gene expression of maize seedlings under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1): 75-81.
- [19] 徐明远, 王谦博, 郭盛磊, 等. 干旱胁迫对刺五加生长以及光合生理参数的影响[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2021, 27(1): 181-187.
- XU M Y, WANG Q B, GUO S L, et al. Effect of drought stress on growth and photosynthetic physiological parameters of *Acanthopanax senticosus*[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2021, 27(1): 181-187.
- [20] 敖远, 杨成德, 郭庄园, 等. 枯草芽胞杆菌‘262XY2’菌肥对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(3): 42-48.
- AO Y, YANG C D, GUO Z Y, et al. Effects of *Bacillus subtilis* ‘262XY2’ on growth and physiological characteristics of tomato seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(3): 42-48.
- [21] 王丹, 赵顺鑫, 吴洋桢, 等. 解钾细菌对滇重楼叶片面积、光合色素含量及生理生化影响[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2022, 28(16): 150-155.
- WANG D, ZHAO S X, WU Y Z, et al. Effect of potassium solubilizing bacteria on leaf area, photosynthetic pigment content, physiology and biochemistry of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2022, 28(16): 150-155.
- [22] 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.
- [23] 张翠梅, 师尚礼, 吴芳. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 868-882.
- ZHANG C M, SHI S L, WU F. Effects of drought stress on root and physiological responses of different drought-tolerant alfalfa varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 868-882.
- [24] 白鹏, 冉春艳, 谢小玉. 干旱胁迫对油菜薹期生理特性及农艺性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(18): 3566-3576.
- BAI P, RAN C Y, XIE X Y. Influence of drought stress on physiological characteristics and agronomic traits at bud stage of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3566-3576.
- [25] PANWAR M, TEWARI R, NAYYAR H. Native halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria *Enterococcus* and *Pantoea* sp. improve seed yield of Mungbean (*Vigna radiata* L.) under soil salinity by reducing sodium uptake and stress injury[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2016, 22(4): 445-459.
- [26] CHEN Y, XU Y P, ZHOU T, et al. Biocontrol of fusarium wilt disease in strawberries using bioorganic fertilizer fortified with *Bacillus licheniformis* X-1 and *Bacillus methylophilus* Z-1[J]. *3 Biotech*, 2020, 10(2): 80.
- [27] RASHID U, YASMIN H, HASSAN M N, et al. Drought-tolerant *Bacillus megaterium* isolated from semi-arid conditions induces systemic tolerance of wheat under drought conditions[J]. *Plant Cell Reports*, 2022, 41(3): 549-569.
- [28] VARDHARAJULA S, ZULFIKAR ALI S, GROVER M, et al. Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus* spp.: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2011, 6(1): 1-14.
- [29] 曲涛, 南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. *草业学报*, 2008, 17(2): 126-135.
- QU T, NAN Z B. Research progress on responses and mechanisms of crop and grass under drought stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 126-135.
- [30] 施燕华. 添加巨大芽胞杆菌对于干旱胁迫下紫花苜蓿幼苗生长影响的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- SHI Y H. Effects of adding *Bacillus gigantilus* on growth of alfalfa seedlings under drought stress [D]. Yangzhou: YangZhou University, 2022.
- [31] 李雪凝, 董守坤, 刘丽君, 等. 干旱胁迫对春大豆超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(15): 93-97.
- LI X N, DONG S K, LIU L J, et al. Effect of drought stress on SOD activity and MDA content of spring soybean[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(15): 93-97.
- [32] AZEEM M A, SHAH F H, ULLAH A, et al. Biochemical characterization of halotolerant *Bacillus safensis* PM22 and its potential to enhance growth of maize under salinity stress[J]. *Plants*, 2022, 11(13): 1721.
- [33] MEREWITZ E B, DU H M, YU W J, et al. Elevated cytokinin content in ipt transgenic creeping bentgrass promotes drought tolerance through regulating metabolite accumulation [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(3): 1315-1328.
- [34] 汪顺义, 刘庆, 史衍玺, 等. 施钾对甘薯氮素转移分配及氮代谢酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3569-3576.
- WANG S Y, LIU Q, SHI Y X, et al. Effects of potassium on nitrogen translocation and distribution and nitrogen metabolism enzyme activities of sweet potato[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(11): 3569-3576.
- [35] 刘晔, 刘晓丹, 张林利, 等. 花生根际多功能高效促生菌的筛选鉴定及其效应研究[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(10): 125-134.
- LIU Y, LIU X D, ZHANG L L, et al. Screening, identification of multifunctional peanut root-promoting rhizobacteria and its promoting effects on Peanuts (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2017, 33(10): 125-134.