



张旭,马婷玉,王玉凤,等.芽胞杆菌对玉米萌芽期低温胁迫的缓解效应[J].黑龙江农业科学,2022(6):11-17.

芽胞杆菌对玉米萌芽期低温胁迫的缓解效应

张旭¹,马婷玉¹,王玉凤^{1,2},杨克军^{1,2}

(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)

摘要:为提高玉米耐低温能力,本研究以玉米品种先玉335为试验材料,测定在低温胁迫下3种芽胞杆菌处理后玉米芽期芽干鲜重、根干鲜重、酶活性及渗透调节物质含量,从而探讨芽胞杆菌对低温胁迫下玉米生长的影响。结果表明:芽胞杆菌可以促进低温下玉米种子的萌发,8℃时,芽胞杆菌处理后玉米芽干重增加24.42%~38.37%,根长增加1.99%~16.50%,根部SOD活性提高6.61%~14.10%,芽中可溶性蛋白含量提高41.19%~50.05%,玉米芽部O₂含量降低了14.71%~24.32%。3种芽胞杆菌可以提高低温胁迫下玉米的抗氧化酶活性,降低超氧阴离子危害,增加渗透调节能力,促进玉米生长发育,缓解低温胁迫造成的伤害。

关键词:玉米;芽胞杆菌;低温胁迫

玉米(*Zea mays* L.)属于典型的喜温C₄作物,整个生育期对温度表现比较敏感^[1]。黑龙江省处于世界黄金玉米带,玉米种植面积位居全国第一。近年来,黑龙江省极端灾害性天气频繁发生,加上倒春寒对玉米的危害,常导致种子萌发缓慢,发芽受阻,极端低温事件的发生将造成减产幅度加大^[2],低温对玉米生长造成的危害严重影响玉米的产量。因此,萌发期耐低温性是寒冷地区早期玉米生长的重要抗逆性状。

研究表明,植物的根际促生菌可以增强作物的抗逆性,植物根际促生菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)是一类可以直接或间接改善植物健康并促进植物生长的细菌,芽胞杆菌属(*Bacillus* sp.)是主要的PGPR种属之一,芽胞杆菌可以通过固氮、产吲哚-3-乙酸(Indole-3-Acetic Acid, IAA)^[3]、产植酸酶、产蛋白酶能力和溶解无机磷及有机磷等方式增加植物营养吸收,分泌抗生素等物质,以保护植物抵御不良环境^[4]。Li等^[5]在研究中发现芽胞杆菌*Bacillus* sp. MGW9提高了玉米种子萌发过程中的耐盐性。王伟^[6]利用低温适应型芽胞杆菌研究发现,

芽胞杆菌对番茄地下部干重、根长、株高有促生作用。Mitra等^[7]研究耐冷PGPR假单胞菌菌株对小麦植株生理变化和生长情况发现,PGPR可以提高冷胁迫下小麦地上部生物量、根系生物量,产量可以提高13.4%;Oksana等^[8]研究表明,枯草芽胞杆菌降低了盐碱胁迫条件下植物细胞的氧化和渗透损伤,促进植物生长,显著提高种子萌发率。芽胞杆菌现在不仅在食品、医学行业大量使用,在农业生产中也得到广泛应用,但芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米的缓解效应研究报道较少。因此,本研究以玉米为试验材料,探讨芽胞杆菌对低温胁迫玉米种子萌发的影响,以期为提高玉米抗低温能力提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试玉米品种为先玉335。

芽胞杆菌菌种为芽胞杆菌(*Bacillus* sp. NECC10713, Bsp713)和解淀粉芽胞杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens* NECC10717, Bam717),均为黑龙江八一农垦大学玉米实验室自行分离纯化鉴定所得;枯草芽胞杆菌(*Bacillus* sp. sn62, SN62)为沈阳农业大学木霉芽胞菌肥研究团队惠赠。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于2021年在黑龙江八一农垦大学寒地作物种质与栽培技术重点实验室进行。将不同菌株活化、转接入LB液体培养基中,

收稿日期:2022-02-20

基金项目:黑龙江玉米产业技术协同创新体系;国家重点研发计划(2018YFD0300101)。

第一作者:张旭(1992-),女,硕士研究生,从事玉米高产理论与栽培技术研究。E-mail: bayinongdazx@163.com。

通信作者:杨克军(1968-),男,博士,教授,博导,从事玉米高产理论与栽培技术研究。E-mail: byndykj@163.com。

190 r·min⁻¹摇床振荡培养 15 h 备用。挑选健康饱满的玉米种子,经 10% 次氯酸钠溶液消毒 10 min,然后用去离子水反复冲洗,用菌剂浓度为 10⁷ cfu·mL⁻¹ 的 3 种芽胞杆菌浸种 12 h 后分别转入垫有湿润滤纸的发芽盒,每盒 20 粒,以等体积无菌水为对照。在人工气候培养箱 65% 湿度 25 ℃ 黑暗培养,生长至芽长 2 cm,24 h 内分别逐渐降至 8,15 和 25 ℃ 恒温,3 次重复,每天用称重法补充发芽盒中的水分。7 d 后取样测定各指标,3 次重复。

1.2.2 测定项目及方法 随机选取不同处理的萌芽期玉米各 5 株,低温胁迫 7 d 进行根长、芽长测定;吸干玉米芽表面水分,称芽鲜重、根鲜重;将样品在 105 ℃ 烘箱中杀青 20 min 放置 80 ℃ 烘干至恒重,称芽干重、根干重。

取低温胁迫 7 d 的玉米根部及芽部,分别采用氮蓝四唑法^[9]测定 SOD 活性;采用高俊凤^[10]的方法测定 APX 活性;采用羟胺氧化法^[11]测定超氧阴离子(O₂⁻)含量;采用蒽酮比色法^[12]测定可溶性糖含量;采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[13]可溶性蛋白含量。

1.2.3 数据分析 采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,采用 Origin 2019b 32Bit 软件作图。

2 结果与分析

2.1 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期生长的影响

由表 1 可知,玉米根长、根鲜重、根干重、芽长、芽鲜重和芽干重随着温度的降低而呈下降趋势,在不同温度下芽胞杆菌可以提高玉米根长、根鲜重、根干重、芽长、芽鲜重和芽干重。

25 ℃ 处理下,3 种芽胞杆菌对玉米根长、根鲜重、根干重和芽干重影响未达显著水平,但却使芽长和芽鲜重显著增加。Bsp713、Bam717 和 SN62 芽长分别比对照增加了 7.43%、4.57% 和 6.13%,芽鲜重分别比对照增加了 12.60%、8.60%、10.60%。

15 ℃ 处理下,3 种芽胞杆菌可以显著提高玉米根长,与对照相比 Bsp713、Bam717 和 SN62 处理根长增加 10.36%~20.06%,根鲜重增加 8.71%~21.61%,根干重增加 7.22%~20.91%、芽长增加 9.15%~14.43%、芽鲜重增加 11.43%~23.71%、芽干重增加 12.77%~18.24%。

8 ℃ 处理下,3 种芽胞杆菌可以提高玉米根长、根鲜重、根干重、芽长、芽鲜重和芽干重,与对照相比 Bsp713、Bam717、SN62 处理根长增加 1.99%~16.50%,根鲜重增加 8.56%~42.78%、根干重增加 12.10%~81.45%、芽长增加 6.09%~19.45%、芽鲜重增加 19.25%~26.74%、芽干重增加 24.42%~38.37%。

表 1 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期生长的影响

温度/℃	处理	根长/cm	根鲜重/g	根干重/g	芽长/cm	芽鲜重/g	芽干重/g
8	对照	5.03±0.306 b	0.187±0.025 b	0.0124±0.002 b	6.17±0.208 b	0.187±0.025 b	0.0172±0.003 b
	Bsp713	5.13±0.252 ab	0.203±0.012 b	0.0139±0.002 b	6.57±0.305 b	0.227±0.021 ab	0.0238±0.004 a
	Bam717	5.17±0.513 ab	0.223±0.035 ab	0.0176±0.005 ab	7.07±0.153 a	0.223±0.015 ab	0.0214±0.001 ab
	SN62	5.86±0.451 a	0.267±0.025 a	0.0225±0.001 a	7.37±0.306 a	0.237±0.031 a	0.0219±0.003 ab
15	对照	9.27±0.306 b	0.310±0.010 b	0.0263±0.002 b	10.60±0.500 b	0.350±0.036 b	0.0329±0.001 b
	Bsp713	10.77±0.569 a	0.337±0.012 ab	0.0282±0.002 b	12.13±0.451 a	0.390±0.036 ab	0.0389±0.002 a
	Bam717	10.23±0.929 ab	0.350±0.036 ab	0.0284±0.001 b	12.00±0.458 a	0.433±0.025 a	0.0371±0.002 a
	SN62	11.13±0.751 a	0.377±0.031 a	0.0318±0.002 a	11.57±0.551 a	0.427±0.047 a	0.0384±0.002 a
25	对照	15.23±0.473 a	0.413±0.047 a	0.0386±0.005 a	15.33±0.551 b	0.500±0.026 b	0.0471±0.004 a
	Bsp713	15.93±0.603 a	0.457±0.135 a	0.0402±0.012 a	16.47±0.152 a	0.563±0.025 a	0.0538±0.012 a
	Bam717	15.20±0.656 a	0.453±0.100 a	0.0397±0.013 a	16.03±0.306 a	0.543±0.035 ab	0.0522±0.015 a
	SN62	15.83±0.306 a	0.473±0.096 a	0.0397±0.009 a	16.27±0.208 a	0.553±0.035 ab	0.0545±0.003 a

注:不同小写字母表示 $P\leq 0.05$ 水平差异显著。下同。

2.2 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期超氧化物歧化酶活性(SOD)的影响

2.2.1 玉米芽部 SOD 活性 由图 1A 可知,低温胁迫下芽胞杆菌可以增加玉米芽部 SOD 活性。

25,15 和 8 ℃ 时 3 种芽胞杆菌处理的玉米芽部 SOD 活性分别比对照提高 4.95%~14.83%、7.96%~20.40% 和 7.17%~11.21%;与常温 25 和 8 ℃ 时对照相比,Bsp713、Bam717、SN62 处理

的玉米芽部 SOD 活性分别提高了 22.53%、35.16%、36.26%和 31.32%。

2.2.2 玉米根部 SOD 活性 芽胞杆菌可以增加根部 SOD 活性(图 1B),25℃时芽胞杆菌处理的玉米根部 SOD 活性比对照提高 5.16%~10.8%;15℃时 SOD 活性比对照提高 10.14%~

13.36%;8℃时枯草芽胞杆菌 SN62 显著提高根系中 SOD 活性,比对照提高 14.10%;Bsp713 和 Bam717 分别比对照提高 9.69%和 6.61%。玉米根部 8℃各处理与 25℃时对应处理相比,玉米根部 SOD 活性分别提高了 6.57%、16.9%、13.62%和 21.6%。

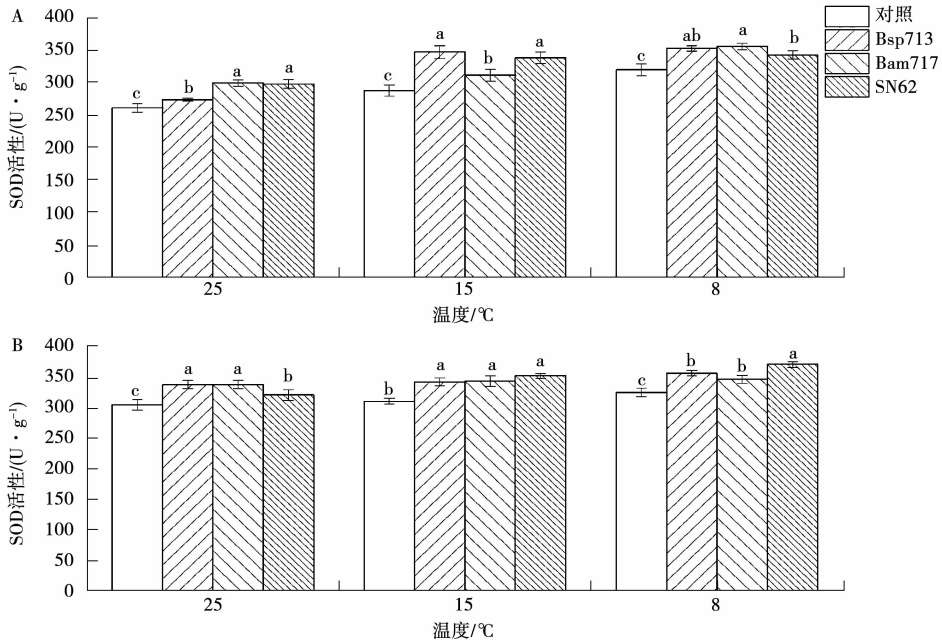


图 1 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期芽部(A)和根部(B)超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

注:不同小写字母表示同一温度下不同处理间差异显著(P≤0.05)。下同。

2.3 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的影响

2.3.1 玉米芽部 APX 活性 由图 2A 可知,随着温度的降低玉米芽部 APX 活性逐渐增加,25℃下对照处理芽部 APX 活性为 270.89 U·g⁻¹,15 和 8℃处理下对照处理芽部 APX 活性分别比 25℃对照提高 19.11%和 37.12%;25℃时 3 种芽胞杆菌处理的玉米芽部 APX 活性,比对照提高 18.25%~31.79%;15℃下芽胞杆菌处理芽部 APX 活性比对照提高 10.12%~22.83%;8℃下芽胞杆菌处理芽部 APX 活性比对照提高 23.33%~31.50%。

2.3.2 玉米根部 APX 活性 由图 2B 可知,不同温度下玉米根部 APX 活性不同,25℃时 3 种芽胞杆菌处理的玉米根部 APX 活性比对照提高 19.19%~44.11%;15℃下 3 种芽胞杆菌处理的玉米根部 APX 活性比对照提高 3.42%~21.72%;8℃下芽胞杆菌处理根部 APX 活性比对照提高 3.26%~20.53%。

2.4 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期可溶性蛋白含量的影响

2.4.1 玉米芽部可溶性蛋白含量 由图 3A 可知,25℃时 3 种芽胞杆菌处理的玉米芽部可溶性蛋白含量比对照提高 1.21%~23.16%;随着温度降低,芽胞杆菌处理后玉米芽部可溶性糖含量提高幅度增加,15℃下 3 种芽胞杆菌处理芽部可溶性蛋白含量比对照提高 1.96%~39.26%;芽胞杆菌在 8℃胁迫时可以提高玉米可溶性蛋白含量,8℃下芽胞杆菌处理玉米芽部可溶性蛋白含量比对照提高 41.19%~50.05%。

2.4.2 玉米根部可溶性蛋白含量 由图 3B 可知,与 25℃处理相比,15 和 8℃处理根系可溶性蛋白含量明显增加。25℃时芽胞杆菌处理可以显著提高玉米根部可溶性蛋白含量,3 种芽胞杆菌处理的可溶性蛋白含量比对照提高 23.49%~52.11%。15 和 8℃下芽胞杆菌处理玉米根部可溶性蛋白含量比对照分别提高 6.12%~10.79%和 4.68%~21.75%。

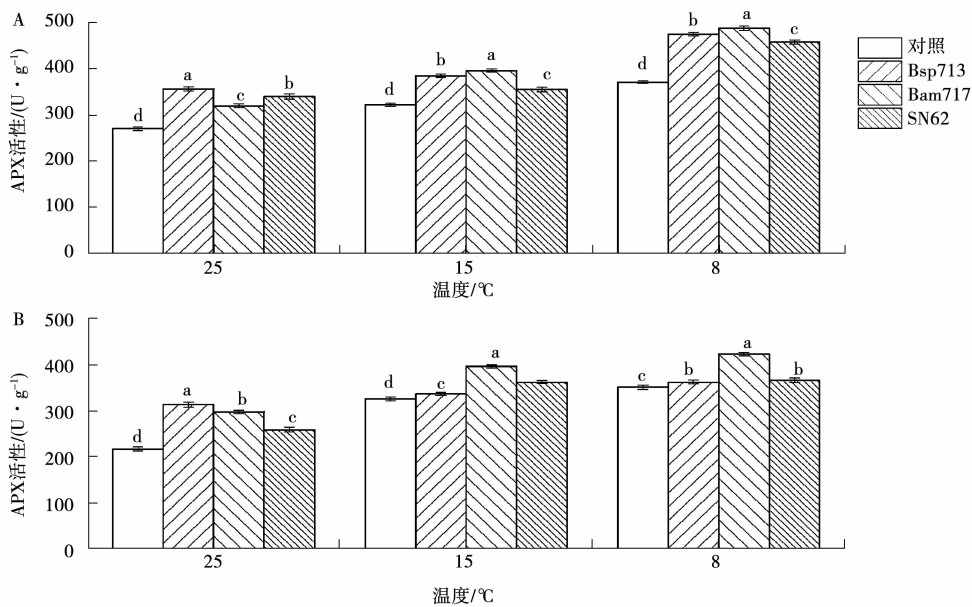


图 2 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期芽部(A)和根部(B)抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的影响

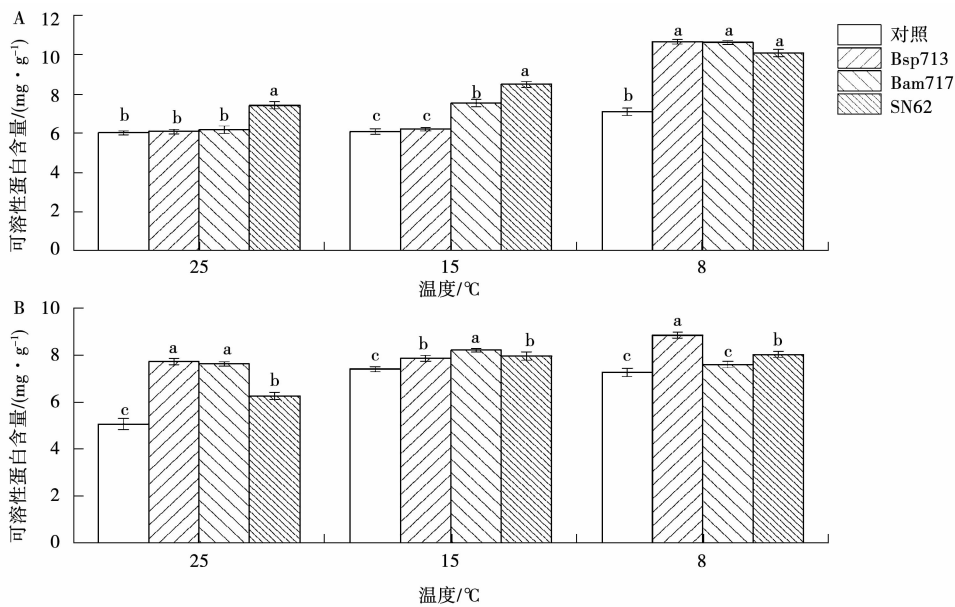


图 3 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期芽部(A)和根部(B)可溶性蛋白含量的影响

2.5 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期可溶性糖含量的影响

2.5.1 玉米芽部可溶性糖含量 如图 4A 所示,随着温度的降低可溶性糖含量呈现上升趋势,25 °C 时 Bam717 处理下玉米芽中可溶性糖含量比对照提高了 4.36%,但处理间差异未达显著水平。Bsp713、SN62 处理下玉米芽中可溶性糖含量分别比对照提高 35.62%和 42.62%,且差异达到显著水平;15 和 8 °C 下芽胞杆菌处理的玉米芽

部可溶性糖含量分别比对照提高 34.6%~48.08%和 47.19%~72.06%。

2.5.2 玉米根部可溶性糖含量 由图 4B 可知,随着温度的降低玉米根部可溶性糖含量逐渐增加。芽胞杆菌可以提高根部可溶性糖含量,25 °C 时 3 种芽胞杆菌处理玉米根部可溶性糖比对照提高 2.68%~12.5%;15 和 8 °C 下芽胞杆菌处理玉米根部可溶性糖含量分别比对照提高 6.43%~32%和 11%~51.51%。

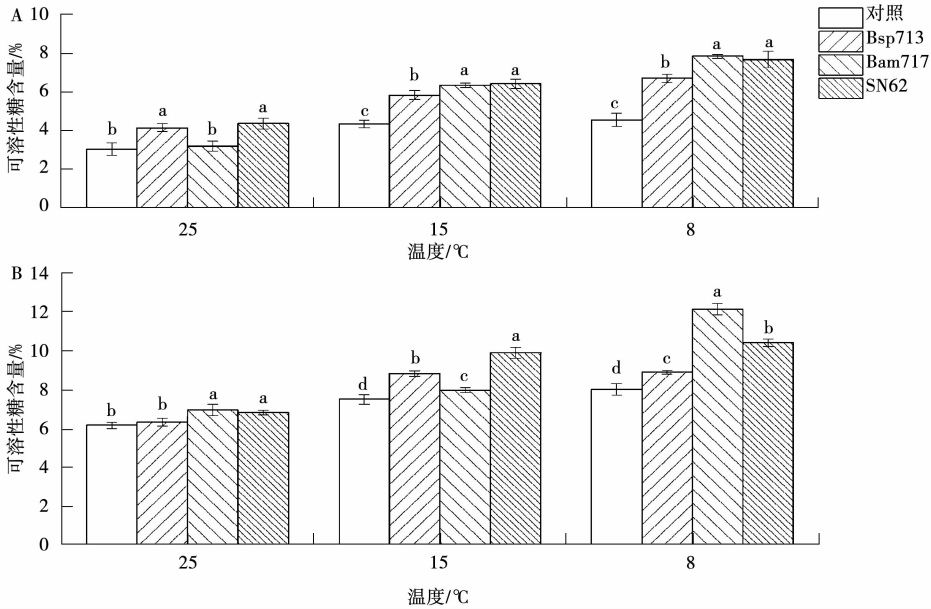


图4 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期芽部(A)和根部(B)可溶性糖含量的影响

2.6 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期超氧阴离子(O₂⁻)含量的影响

2.6.1 玉米芽部超氧阴离子含量 如图5A可知,低温胁迫能增加玉米芽部 O₂⁻ 含量。25,15 和 8 °C 时,3 种芽胞杆菌处理芽部 O₂⁻ 含量分别较对照降低 8.84%~12.85%、4.17%~18.56% 和 14.71%~24.32%。

2.6.2 玉米根部超氧阴离子含量 如图5B可知,随着温度的不同,玉米根部 O₂⁻ 含量变化不同,25 °C 时,根部各处理间 O₂⁻ 含量差异未达到显著水平,15 °C 下芽胞杆菌处理的玉米根部 O₂⁻ 含量比对照降低 21.72%~43.44%;8 °C 下芽胞杆菌处理的玉米根部 O₂⁻ 含量比对照降低 17.88%~50.26%。

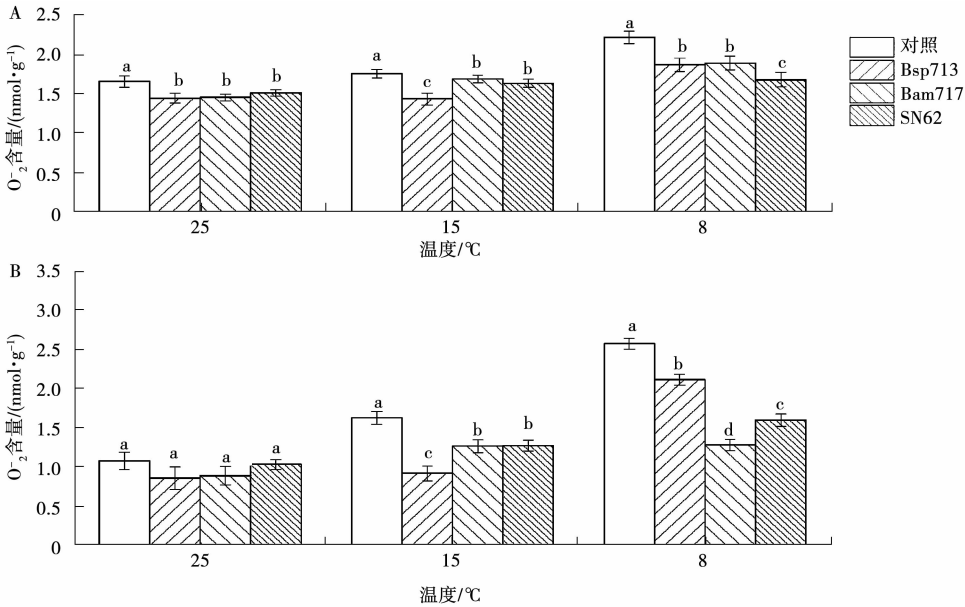


图5 芽胞杆菌在低温胁迫下对玉米芽期芽部(A)和根部(B)超氧阴离子(O₂⁻)含量的影响

3 讨论

根系是植物吸收水分的主要器官,相关研究发现 PGPR 能够分泌 IAA,促进土壤养分循环,芽胞杆菌具有良好的定殖能力和竞争优势,能够增加作物根长及根表面积^[14-15]。郭立佳等^[16]研究认为 JK05 菌株与解淀粉芽胞杆菌相似,具有溶解无机磷和生产 IAA 的能力,能促进香蕉的生长。本试验室前期结果表明,芽胞杆菌 Bsp713 和 Bam717 具有分泌 IAA、产蛋白酶的能力,在低温胁迫下芽胞杆菌可以显著增加玉米根长、根干重和根鲜重,这说明芽胞杆菌可以提高玉米对低温胁迫的抵御能力,并且对植株有促生作用。

植物在遭受逆境胁迫时,活性氧产生和清除平衡失调造成细胞膜系统损伤,超氧阴离子伤害植物的机理之一在于参与启动膜脂过氧化或膜脂脱酯作用,从而破坏膜结构^[17-18]。SOD 是超氧阴离子自由基的有效清除剂之一,SOD 活性、APX 活性变化可以用来衡量玉米芽期耐低温胁迫的强弱,可有效提高植物的抗逆性,对细胞起着重要的保护作用^[19]。SOD 活性、APX 活性以及超氧阴离子含量均可作为抗寒性鉴定的生理生化指标。田景花等^[20]研究表明低温胁迫干扰了植物细胞中活性氧产生与清除之间的平衡。本研究结果表明,在 15 和 8℃ 下 O₂ 含量较 25℃ 下明显增加,随着温度的降低 SOD 活性、APX 活性呈上升趋势,同一温度下芽胞杆菌处理玉米芽部和根部的 SOD 活性、APX 活性均高于对照,超氧阴离子含量低于对照;芽胞杆菌 Bsp713 在 15℃ 下芽部 SOD 含量和 APX 活性分别比对照提高了 20.4% 和 19.49%,超氧阴离子含量比对照降低了 18.56%;SOD 活性、APX 活性随着温度的降低而升高,说明低温诱导提高了玉米体内 SOD 活性^[21]。芽胞杆菌处理可以提高 SOD 活性和 APX 活性,有效减缓低温对生物膜膜脂造成的伤害、降低超氧阴离子对玉米的伤害,低温胁迫下 SOD、活性、APX 活性的增加可以降低超氧阴离子含量,从而减缓了超氧阴离子自由基歧化反应,表明芽胞杆菌能有效缓解低温胁迫对玉米的伤害。

当受到逆境胁迫时植株通过主动积累可溶性蛋白、可溶性糖等渗透调节物质提高细胞的保水能力,对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用^[22]。陈笑莹^[23]研究结果表明玉米为了适应低温逆境条件,会主动积累可溶性糖来降低冰点和

渗透势。罗欢等^[24]研究发现番茄施用巨大芽胞杆菌在盐碱胁迫下可以增加可溶性蛋白含量。宋苏蒙^[25]研究表明在不同低温下,玉米可溶性糖含量随着温度的降低而增加。本研究表明同一温度下,芽胞杆菌可以显著提高玉米芽部和根部可溶性糖含量和可溶性蛋白含量,可溶性糖含量增加能够帮助植物细胞抵御逆境低温胁迫^[26]。以上研究表明随着温度的降低,可溶性糖含量和可溶性蛋白含量增加,芽胞杆菌能够有效缓解在渗透调节方面给玉米带来的伤害。

芽胞杆菌作为 PGPR 之一,能够对玉米的根长有一定的促进作用,本试验中使用的 3 种芽胞杆菌对玉米的生理指标均有一定促进作用,但菌株之间还存在一定的差异。芽胞杆菌 Bsp713 与解淀粉芽胞杆菌 Bam717 和枯草芽胞杆菌 SN62 相比,低温胁迫提高了玉米的 SOD 含量和可溶性糖含量,降低了超氧阴离子对玉米的伤害;而解淀粉芽胞杆菌 Bam717 对可溶性蛋白含量影响较为显著,其原因可能与菌株本身的功能有关。

4 结论

本试验结果表明,低温胁迫下芽胞杆菌处理的 SOD 活性、APX 活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量均较对照明显增加,降低了超氧阴离子含量,增加玉米的耐低温能力。供试的 3 种芽胞杆菌可以提高玉米在低温胁迫下的保护酶活性,缓解低温胁迫带来的伤害,促进低温条件下玉米芽和根系的生长,表明这 3 种芽胞杆菌均能缓解低温胁迫对玉米的伤害。

参考文献:

- [1] 王琪,马树庆,郭建平,等. 温度对玉米生长和产量的影响[J]. 生态学杂志,2009,28(2):255-260.
- [2] 田宝星,于敏,李浩然,等. 黑龙江省春季低温指数及其对作物产量的影响[J]. 中国农学通报,2018,4(25):97-103.
- [3] SANTOYO G,OROZCO-MOSQUEDA M D C,GOVINDAPPA M. Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: A review[J]. Biocontrol Science and Technology, 2012,22:8855-8872.
- [4] 何敏,王秀璞,李彦,等. 两株耐寒 PGPB 的分离及其对藏北当地牧草生长的影响[J]. 广西植物,2021,41(9):1425-1432.
- [5] LI H,YUE H,LI L,et al. Seed biostimulant *Bacillus* sp. MGW9 improves the salt tolerance of maize during seed germination[J]. AMB Express, 2021,11(1):74.
- [6] 王伟. 低温适应型植物根际促生菌的筛选及促生效应研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.

- [7] MITRA D,AMD R,PARRA-COTA F I,et al. Amelioration of thermal stress in crops by plant growth-promoting rhizobacteria [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*,2021,115:101679.
- [8] OKSANA L,SASAN A,DARYA G,et al. Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* strain-specifically improves growth of *Phaseolus vulgaris* plants under normal and salinity conditions and exerts anti-stress effect through induced lignin deposition in roots and decreased oxidative and osmotic damages[J]. *Journal of Plant Physiology*,2021,263:153462.
- [9] 沈文彪,徐朗莱,叶茂炳,等. 氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶活性的适宜条件[J]. *南京农业大学学报*,1996(2):101-102.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:221-223.
- [11] 王爱国,罗广华. 植物的超氧物自由基与羟胺的反应的定量关系[J]. *植物生理学通讯*,1990(6):3.
- [12] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [13] 胡景江,孙群. 植物生理学研究技术[M]. 杨凌:西北农林科技大学出版社,2006.
- [14] 王恒煦,刘泽平,王志刚,等. 3 株芽胞杆菌在水稻根际定殖促生及其在土壤中的存活[J]. *生态与农村环境学报*,2019,35(7):892-899.
- [15] 马婷玉. 芽胞杆菌功能鉴定及其对玉米耐盐碱能力的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2021.
- [16] 郭立佳,汪军,杨腊英,等. 芽胞杆菌 JK05 的鉴定及其对香蕉、玉米的促生和生防潜能研究[J]. *热带作物学报*,2020,41(2):351-358.
- [17] CHEN L J,XIANG H Z,MIAO Y,et al. An overview of cold resistance in plants[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*,2014,200:237-245.
- [18] SHENG Y,ABREU I A,CABELLI D E,et al. Superoxide dismutases and superoxide reductases [J]. *Chemical Reviews*,2014,114(7):3854-3918.
- [19] 冯高阁. 超氧化物歧化酶临床药理研究进展[J]. *江西医学院报*,1993(4):102-106.
- [20] 田景花,王红霞,张志华,等. 低温逆境对不同核桃品种抗氧化系统及超微结构的影响[J]. *应用生态学报*,2015,26(5):1320-1326.
- [21] 李文杰. 超氧化物歧化酶在治疗超氧阴离子自由基所引起的疾病及抗衰老上的应用[J]. *中国药理学杂志*,1989(7):397-401.
- [22] 朱政,蒋家月,江昌俊,等. 低温胁迫对茶树叶片 SOD、可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响[J]. *安徽农业大学学报*,2011,38(1):24-26.
- [23] 陈笑莹. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米碳氮代谢的影响[D]. 北京:中国科学院,2014.
- [24] 罗欢,伍辉军,谢永丽,等. 巨大芽胞杆菌 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄生长及耐盐生理生化指标的影响[J]. *植物保护学报*,2013,40(5):431-436.
- [25] 宋苏蒙. 低温对玉米种子萌发及生理生化指标的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [26] 成铁龙,李焕勇,武海雯,等. 盐胁迫下 4 种耐盐植物渗透调节物质积累的比较[J]. *林业科学研究*,2015,28(6):826-832.

Alleviation Effect of *Bacillus* on Low Temperature Stress in Maize Germination Stage

ZHANG Xu¹, MA Ting-yu¹, WANG Yu-feng^{1,2}, YANG Ke-jun^{1,2}

(1. Agricultural College, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation Techniques and Crop Germplasm Improvement in Heilongjiang Province, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to improve the low temperature tolerance of maize, this study took maize variety Xianyu 335 as the experimental material to determine the dry and fresh weight of buds, dry and fresh weight of roots, enzyme activity and osmotic adjustment substance content after treatment with three kinds of *Bacillus* under low temperature stress, so as to explore the effect of *Bacillus* on the growth of maize under low temperature stress. The results showed that *Bacillus* could promote the germination of maize seeds under low temperature. At 8 °C, the dry weight of buds increased by 24.42%-38.37%, the root length increased by 1.99%-16.50%, the SOD activity in roots increased by 6.61%-14.10%, the soluble protein content in buds increased by 41.19%-50.05%, and the O₂ content in buds decreased by 14.71%-24.32%. These three *Bacillus* species could improve the antioxidant enzyme activity of maize under low temperature stress, reduce the damage of superoxide anion, and increase the osmotic adjustment ability, promote growth and development of maize and alleviate the damage caused by low temperature stress.

Keywords: maize; *Bacillus*; low temperature stress