

张超,马晓丽,卢晓峰,等.盐分胁迫下土施甲哌镆对棉苗叶片生理和根系形态的影响[J].江苏农业科学,2022,50(22):81-86.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.22.011

盐分胁迫下土施甲哌镆对棉苗叶片生理和根系形态的影响

张超¹,马晓丽¹,卢晓峰¹,李刚¹,耿怡爽²,孙云保³,杨修一²,耿计彪²

(1.金沂蒙集团有限公司,山东临沂 276700; 2.山东省水土保持与环境保育重点实验室/临沂大学资源环境学院,山东临沂 276005;
3.中华联合财产保险股份有限公司山东分公司,山东济南 25000)

摘要:棉花是中度耐盐作物,但在萌发和生长早期对盐分胁迫较敏感。甲哌镆常用以调节棉花源库关系,它能否提高棉花幼苗抗盐性能尚不明晰。开展 150 mmol/L NaCl 盐胁迫下的盆栽试验,添加不同量甲哌镆(0、4、8、12、16、24 mg/kg 土),从棉花叶片生理和根系形态揭示幼苗对盐分胁迫的反应机制。结果表明盐分胁迫下,甲哌镆对地上部器官生物量和茎粗无显著影响,但使根系生物量每盆增加 0.1~0.2 g,根冠比显著提升。12、16 mg/kg 土处理的幼苗根系活力最高,且甲哌镆的施用显著增加根系长度、体积、表面积和直径。甲哌镆对叶片叶绿素 a 的提升作用大于叶绿素 b,以 12、16 mg/kg 土处理的叶绿素 a 含量最高。甲哌镆抑制了超氧阴离子自由基和过氧化氢的产生,且随剂量的增加呈先降后升的趋势。中等浓度甲哌镆处理(8~16 mg/kg)增加了叶片蛋白含量,提高过氧化氢酶、过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性,并显著降低丙二醛产生量,减轻了盐胁迫对幼苗的过氧化伤害。在盐分胁迫下,甲哌镆通过调节棉花幼苗根系生长,增加根系活力,提高叶片抗氧化酶的活性,缓解了盐分胁迫导致的膜脂过氧化损伤,以施 12~16 mg/kg 土用量最为适宜。

关键词:甲哌镆;棉花幼苗;抗氧化酶;根系形态;土壤盐胁迫

中图分类号:S562.01;S562.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)22-0081-06

土壤盐分是一种主要的非生物胁迫,对全球作物生产和农业可持续发展产生不利影响^[1]。它通过离子效应抑制作物组织和器官生长,导致作物无法吸收足够的水分与营养,造成发育迟缓^[2-3]。棉花被认为是一种中度耐盐作物,但其在萌发和幼苗生长期对盐度较为敏感^[4]。盐分会导致细胞离子毒性和渗透调节过程的不平衡,降低叶绿素含量,影响抗氧化酶活性,抑制棉苗生长^[5]。盐胁迫也会降低初生根和侧根的生长,降低根生物量。当盐在土壤剖面内分布不均匀时,根系通过吸收低盐度土壤区域的营养元素来调整其形态^[6]。因此,通过合理的农艺管理措施(如适当施用肥料或植物生长调节剂),消除盐分胁迫导致的种子萌发和出苗障碍,

是保证盐碱地棉苗齐整的重要措施。

甲哌镆是常用的抑制性外源生长调节剂,通过抑制赤霉素合成,降低节间长度,提高光利用效率^[7],促进棉花早熟和高产^[8]。甲哌镆半衰期短,有效期为 15~20 d,故多采用多次叶面喷施的形式调节棉花生长势,优化冠层结构^[9]。在蕾期和花铃期喷施甲哌镆,可促进矿质元素吸收,提高皮棉产量^[10],且随着剂量的增加,纤维长度和强度增加,但在花铃期后喷施,不影响棉铃质量和数量^[11]。也有研究表明在棉籽上喷施甲哌镆会降低棉苗株高,产生更多根系生物量,但不改变发育进程或成熟时间^[12]。多次叶面喷施会增加植棉用工,在当前农村劳动力短缺的背景下,不利于植棉效益的提高。利用甲哌镆浸种,可以提高根系活力,有效改善植株活性氧代谢,降低膜脂过氧化损伤^[13]。目前,甲哌镆通过叶面喷施或浸种对棉花生长的调控研究较多,但在盐分胁迫下,土壤施用甲哌镆能否提高幼苗抗盐性能尚不明确。本研究以 150 mmol/L NaCl 盐胁迫下的盆栽试验,探究不同量甲哌镆对根系和叶片生理特性的影响,为丰富和拓展棉花抗盐机制提供理论依据,为盐碱地高产植棉提供农艺技术

收稿日期:2021-12-07

基金项目:国家自然科学基金(编号:42007091);山东省高等学校青创人才引育计划(水土流失过程与生态调控);山东省自然科学基金(编号:ZR2020QC163)。

作者简介:张超(1979—),男,山东临沂人,工程师,从事生态肥料的研究开发。E-mail:jympxxz@163.com。

通信作者 耿计彪,博士,从事土肥资源高效利用方面的研究。
E-mail:gengjibiao@126.com。

支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在临沂大学温室(118°19′8″E,35°05′23″N)进行,温度为(30±5)℃,相对湿度为(45±5)%。土壤为粉沙壤土:10.1%沙粒,11.9%黏粒,78.0%粉粒,pH值为7.7。土壤含有机碳13.5 g/kg、全氮1.02 g/kg、NH₄⁺-N 33.3 mg/kg、NO₃⁻-N 42.3 mg/kg、速效钾138.2 mg/kg、有效磷48.0 mg/kg和有效硫30.3 mg/kg。棉花品种为鲁棉研28,甲哌鎓纯度为98.0%。

1.2 试验设计

将1 g甲哌鎓溶解于1 L蒸馏水中,分别取0、10、20、30、40、60 mL溶液加入过孔径3 mm筛的2.5 kg土壤中。每盆定植2株,因此相当于1 kg土壤施0、4、8、12、16、24 mg甲哌鎓,每个处理重复3次。将甲哌鎓与土壤搅拌均匀后,装至花盆中(规格:高度18 cm,顶部直径20 cm,底部直径18 cm)。种植前,将棉籽用6%双氧水消毒表面10 min,用蒸馏水冲洗后,放入去离子水中,30℃避光浸泡24 h。于2019年4月30日选择4颗饱满种子,种植在花盆中,等伸展3叶后(5月15日),每盆定植2株长势均匀的幼苗。

以NaCl溶液模拟盐分胁迫,种植前每盆浇灌500 mL含150 mmol/L NaCl的霍兰格营养液,然后进行覆膜。播种后的第二周和第四周分别浇灌相同溶液,于6月10号收获棉苗。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 农艺性状测定 收获时,将幼苗从花盆中倒出,用纱网整体包住根部,采用清水冲洗根上的泥土,分为根系和地上2个部分。用直尺测定土壤表面至主茎生长点的长度,作为株高;用游标卡尺测量基部的茎粗。待根系和叶片指标测定完成后,分别放入不同纸袋,置于75℃烘箱烘至恒质量,称量各部分质量。根据根生物量与地上部器官生物量的比值计算根冠比。

1.3.2 可溶性蛋白质含量和抗氧化酶活性 棉苗收获后,新鲜叶片样本用100 mmol/L的磷酸缓冲液浸提,液氮冷冻条下研磨成匀浆。于12 000 r/min(4℃)下离心20 min,取上清液作为组织提取液,测定H₂O₂含量和超氧阴离子自由基(O₂⁻·)生成速率^[14]。采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白

质含量,过氧化物酶(peroxidase,POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(catalase,CAT)活性用愈创木酚-过氧化氢法测定,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定。丙二醛(malondialdehyde,MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[15]测定。叶片经80%丙酮浸提后,采用可见光分光光度计比色测定叶绿素含量^[16]。1.3.3 根系形态和活力测定 根系洗净后采用平板图像扫描仪(Epson Expression/STD LC-4800)进行扫描,并通过WinRhizo软件对图像进行分析,以确定根的体积、长度、直径、表面积和根尖数量。用氯化三苯基四氮唑比色法^[17]测定根系的还原能力。

1.4 统计分析

运用Microsoft Excel 2010对数据进行预处理,采用SAS 9.2统计分析系统(SAS Institute,Cary,NC,2010)进行方差分析(ANOVAs)和差异显著性分析。使用SigmaPlot 10软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 甲哌鎓对棉花幼苗生物量的影响

甲哌鎓用量对棉花幼苗地上部器官生物量无显著影响,生物量保持在0.5~0.6 g(表1)。不同甲哌鎓处理每盆根生物量较对照显著增加0.1~0.2 g,但甲哌鎓处理间无显著差异。根冠比变化趋势与根生物量变化类似:甲哌鎓施用显著提高根冠比,8、12 mg/kg甲哌鎓处理显著高于24 mg/kg处理。

表1 甲哌鎓对棉花幼苗生物量的影响

甲哌鎓用量 (mg/kg)	地上部器官生物量 (g/盆)	根生物量 (g/盆)	根冠比 (%)
0	0.5a	0.1b	0.2b
4	0.5a	0.2a	0.4b
8	0.5a	0.2a	0.4b
12	0.5a	0.3a	0.6a
16	0.6a	0.3a	0.5a
24	0.5a	0.2a	0.4b

注:同一列数值后相同字母表示在0.05水平上差异不显著。下同。

2.2 甲哌鎓对棉花幼苗茎粗和株高的影响

甲哌鎓处理的平均茎粗为2.19~2.46 mm,对照为2.12 mm(图1-A),但不同量甲哌鎓处理与对照组未表现出显著差异。施用不同量甲哌鎓的处理间株高差异显著,且随着施用量的增加而降低(图1-B),对照植株明显高于其他处理,4 mg/kg

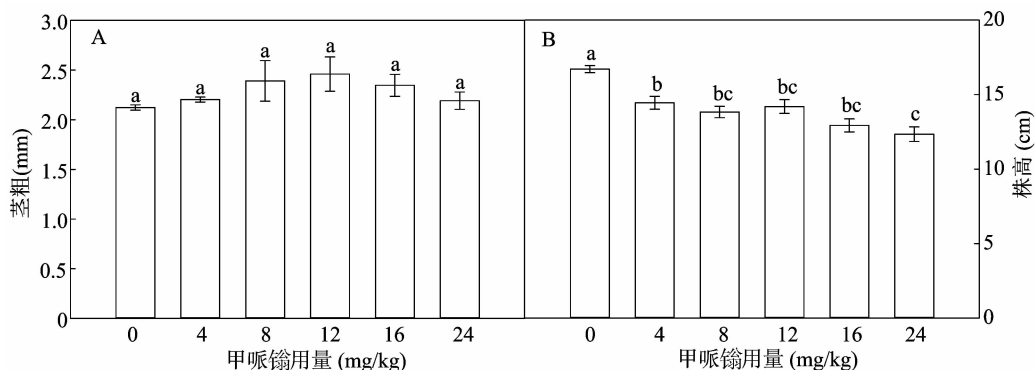


图1 甲哌镓对棉花幼苗茎粗(A)和株高(B)的影响

甲哌镓处理显著高于 24 mg/kg 甲哌镓处理,而 8、12、16、24 mg/kg 甲哌镓处理间无显著差异。

2.3 甲哌镓对棉苗叶片叶绿素含量的影响

施用 12、16 mg/kg 甲哌镓处理的叶绿素 a 含量

分别为 0.62、0.61 mg/g,显著高于 0、4、8、24 mg/kg 处理 (图 2 - A),甲哌镓处理之间叶绿素 b 含量无显著差异,但在 12 mg/kg 处理中,叶绿素 b 含量较对照显著提高 20.8% (图 2 - B)。

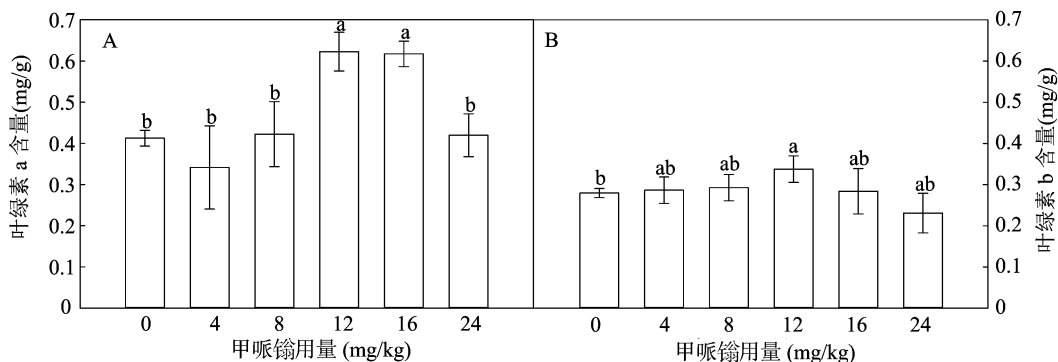


图2 甲哌镓对棉花幼苗叶片叶绿素 a(A)和 b(B)含量的影响

2.4 甲哌镓对棉花幼苗叶片酶活性和丙二醛含量的影响

施用 4、8、24 mg/kg 甲哌镓处理的棉花幼苗叶片的超氧阴离子自由基产生速率与对照无显著差

异,但显著高于 12、16 mg/kg 处理 (图 3 - A)。施用 12、16 mg/kg 甲哌镓处理过氧化氢含量最低,分别为 1.56、1.58 $\mu\text{mol/g}$,其他处理间差异不显著 (图 3 - B)。

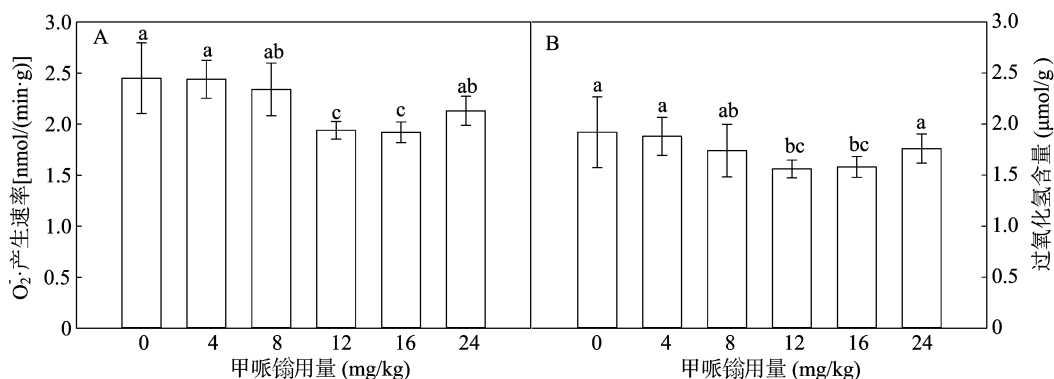


图3 甲哌镓对棉花幼苗叶片超氧阴离子自由基产生速率(A)和过氧化氢含量(B)的影响

12 mg/kg 甲哌镓处理的叶片蛋白质含量最高,较其他处理高出 12.1% ~ 28.8%,0、4、8、16、24 mg/kg 甲哌镓处理之间差异不显著 (图 4 - A)。盐胁迫下棉花幼苗叶片的 CAT、POD 和 SOD 酶活

性表现出类似变化趋势,具体来说,12 mg/kg 甲哌镓处理的 CAT 活性最高,达 50.48 U/g (图 4 - B),12、16 mg/kg 甲哌镓处理的 CAT 活性高于对照组和 24 mg/kg 处理的活性,4、8、24 mg/kg 甲哌镓处

理与对照组没有显著差异。甲哌镈施用使 POD 活性显著增强,4、8、12、16 mg/kg 甲哌镈处理均显著高于对照组,但 24 mg/kg 甲哌镈处理和对照组没有显著差异 (图 4 - C)。与对照组相比,4、12、

16 mg/kg 甲哌镈处理的 SOD 活性显著增强,24 mg/kg 甲哌镈处理最低,仅为 28.98 U/g,与对照差异不显著 (图 4 - D)。

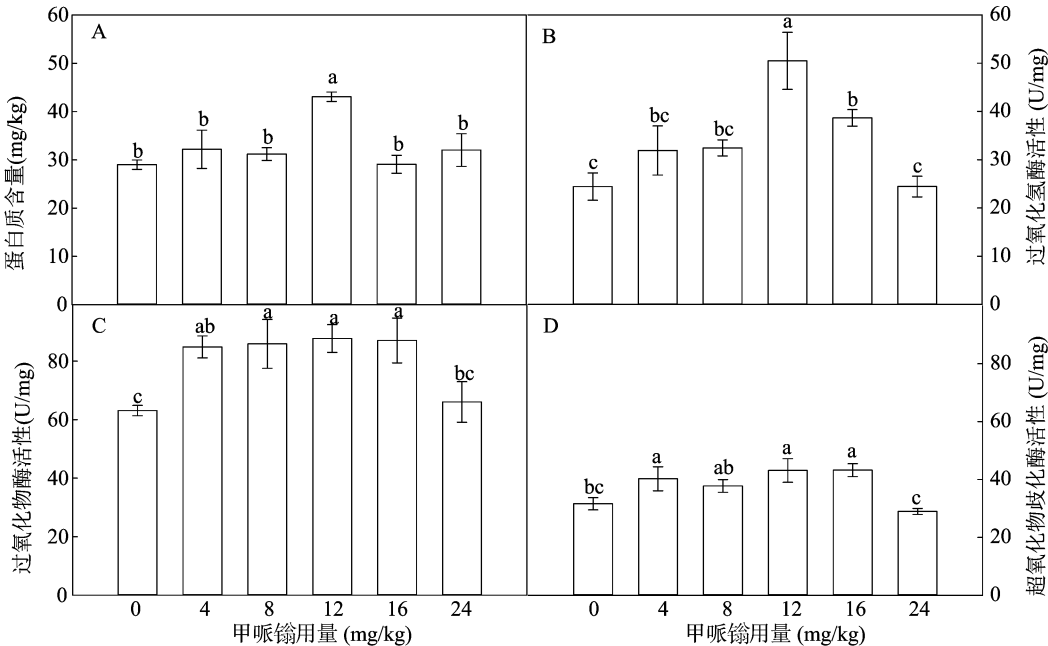


图4 甲哌镈对棉花幼苗叶片酶活性和蛋白质含量影响

丙二醛含量总体而言,甲哌镈处理的丙二醛含量比对照降低了 2.8% ~ 34.7% (图 5)。对照和 24 mg/kg 甲哌镈处理的丙二醛含量最高,显著高于 8、12、16 mg/kg 处理。

于 4、24 mg/kg 处理,而 4、24 mg/kg 甲哌镈处理显著高于对照,4、8、16、24 mg/kg 甲哌镈处理之间没有显著差异。在根系平均直径方面,甲哌镈处理比对照增加了 18.4% ~ 28.6%,不同甲哌镈处理间无显著差异。12 mg/kg 甲哌镈处理的根系体积显著高于 24 mg/kg 处理,也显著高于对照;与 24 mg/kg 甲哌镈处理相比,12 mg/kg 处理的根体积增加了 41.9%,但在 4、8、12、16 mg/kg 甲哌镈处理之间没有显著差异。与对照组相比,甲哌镈也使根尖的数量增加了 196% ~ 449%,数量最多的是 12 mg/kg 甲哌镈处理,达到 1 419 个,显著高于 16 mg/kg 处理,其余依次为 8、4、24 mg/kg 处理。

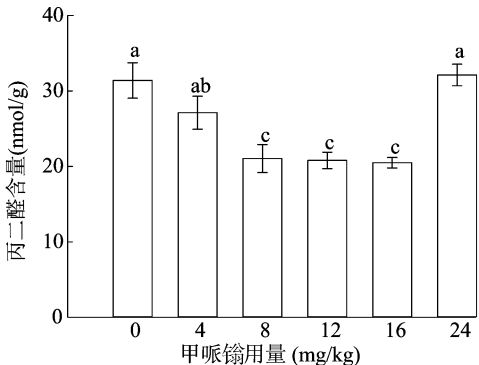


图5 甲哌镈对棉花幼苗叶片丙二醛含量的影响

2.5 甲哌镈对棉花幼苗根系形态的影响

在盐胁迫下,不同甲哌镈用量对棉花根系形态影响较大,甲哌镈处理的根长比对照增加了 65.9% ~ 142.4%,且 4 ~ 12 mg/kg 范围内根长随着甲哌镈用量的增加而增加,后随着甲哌镈用量增加根长下降 (表 2)。施用 8、12 mg/kg 甲哌镈处理的根长显著高于 4、24 mg/kg 处理,在 4、16、24 mg/kg 处理之间无显著差异。12 mg/kg 处理的表面积最大,显著高

2.6 甲哌镈对棉花幼苗根系活力的影响

盐分胁迫下,随甲哌镈用量增加,根系活力呈现先增加后降低的趋势 (图 6)。12、16 mg/kg 甲哌镈处理根系活力最高,分别为 50.49、48.84 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,4、24 mg/kg 处理与对照组差异不显著。

3 讨论

3.1 盐分胁迫下甲哌镈对棉花幼苗生长的影响

环境胁迫会抑制棉花的生长或致其死亡,尽管

表 2 甲哌镓对棉花幼苗根系形态的影响

甲哌镓用量 (mg/kg)	长度 (cm)	表面积 (cm ²)	根直径 (mm)	根体积 (cm ³)	根尖数 (个)
0	377.4d	58.6c	0.5b	0.7c	258d
4	654.8c	130.7b	0.6a	2.0ab	892bc
8	849.9ab	155.0ab	0.6a	2.3ab	990bc
12	914.9a	180.2a	0.6a	2.4a	1 419a
16	739.9bc	145.7ab	0.6a	2.3ab	1 036b
24	626.2c	116.3b	0.6a	1.7b	764c

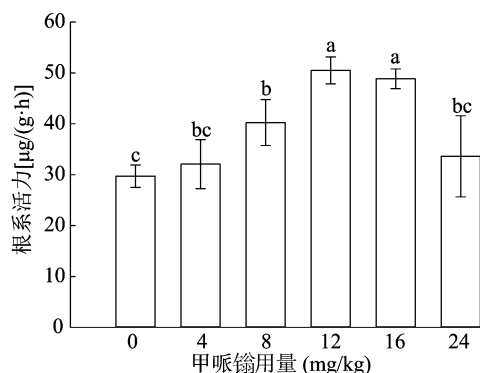


图6 甲哌镓对棉花幼苗根系活力的影响

棉花被视为中度耐盐碱作物,但其在种子萌发和幼苗阶段对盐度的敏感性高于发育后期^[18],度过种苗期,盐分对棉株的伤害便逐渐减缓。盐分胁迫主要通过限制根系对营养离子的吸收,导致盐分离子富集和渗透调节失衡^[19]。本研究表明,在土壤中施用甲哌镓后,棉花幼苗株高下降,这可能由于甲哌镓可抑制赤霉素(GA)代谢基因和生物合成,降低了内源性GA的水平,抑制细胞伸长,导致植株高度降低^[20],这一结果与于起庆等的研究结论^[21]一致。甲哌镓增加了盐胁迫下幼苗的茎粗,形成“矮壮苗”,此种生长模式更利于提高幼苗对环境胁迫的抵抗,为后期的开花和结铃奠定基础^[22]。

根系是棉花与环境进行能量和物质交换的重要器官,构建良好根系形态对冠层发育和产量构成具有显著影响^[23]。盐胁迫可降低根系对养分和水的吸收率,影响根系生长^[24]。本试验中,甲哌镓显著增加了根生物量,且随施用量的增加呈现先增后减的趋势。由于根系是接触甲哌镓的首要器官,甲哌镓被吸收后,对根系的影响较为显著。这表明盐分胁迫下,根的生长对甲哌镓的敏感性高于茎、叶,协调了地上和地下生物的分配,增加幼苗抗盐性能。在棉花种子上喷施甲哌镓的试验,也得出类似结果^[12]。

有研究表明,喷施甲哌镓后,棉花的根系变长,

表面积增大,根系活力和养分吸收能力也有所提高^[25-26]。在本试验中,甲哌镓用量影响根的长度、比表面积和体积,但是平均直径未产生显著变化。这表明甲哌镓主要通过增加侧根数量来塑造根系形态,使根系能获取更大根土界面,提高其养分吸收能力。根系活力是判断根系生理功能活跃性的重要指标^[27],盐胁迫会降低根系活力。甲哌镓显著提升了根系活力,以12、16 mg/kg处理最为明显。这可增加根对养分的吸收,提升抗盐性能,也会改善根系渗透调节,减轻盐分离子对根的毒害作用。当然,不同棉花品种对甲哌镓的敏感性存在差异^[11],进一步揭示在不同品种、土壤类型中的适宜甲哌镓用量和作用机制,有助于提升幼苗成活率和抗盐性能。

3.2 盐分胁迫下甲哌镓对幼苗叶片叶绿素与抗氧化酶活性的影响

叶绿素是与光合性能直接相关的重要生理指标,轻度环境胁迫会增加叶片叶绿素含量^[5]。本研究中12、16 mg/kg甲哌镓处理的叶绿素a含量高于对照,但最低(4 mg/kg)和最高(24 mg/kg)处理的含量与对照组无差异;而叶绿素b含量除12 mg/kg处理显著高于对照外,其余处理间均无显著差异。表明甲哌镓对叶绿素a的影响大于叶绿素b,这是由于胁迫条件下叶绿素降解过程中,叶绿素b易转化为叶绿素a^[28],导致叶绿素a/b比值变大;而叶绿素a和叶绿素b总值的增加会提升棉株光合作用,促进有机物积累,为高产奠定物质基础,这与郑青松等用甲哌镓浸种得出的结果^[29]一致。

活性氧(ROS)是具有氧化能力的分子、离子和自由基,作为信号分子参与作物生长发育和非生物胁迫应答等过程^[30-31]。盐胁迫会导致棉花叶片ROS增加,并引发膜脂过氧化作用,破坏细胞膜系统^[32]。本研究表明,12~16 mg/kg甲哌镓处理显著降低了超氧阴离子自由基和H₂O₂的产生量,减少丙二醛的产生,这与王宁等采用甲哌镓浸种的结果^[13]相似。甲哌镓的应用提高了CAT和POD的活性,不同用量之间CAT活性变化较大。这可能是由于CAT的活性主要受遗传效应-环境交互作用的控制^[33],CAT的变化对甲哌镓更敏感。本研究中低-中浓度施用甲哌镓(4~16 mg/kg)可以提高SOD活性,而在最高施用量(24 mg/kg)时,SOD活性与对照组无显著差异,这可能是由于高浓度的甲哌镓对棉花幼苗产生了毒性。综上,在盐分胁迫下,土施

甲哌噻使抗氧化酶的活性增强,丙二醛的积累减少,膜脂过氧化损伤减少,延缓了叶片衰老。

4 结论

甲哌噻显著增加根系长度、体积和表面积,12、16 mg/kg 甲哌噻处理的叶绿素含量最高,且抑制了超氧阴离子自由基和过氧化氢的产生。叶片蛋白质含量和抗氧化酶活性随甲哌噻浓度的增加,呈现先增后减的趋势,以中等浓度处理最优。因此,在盐分胁迫下,甲哌噻提升根系活力,缓解了盐分胁迫导致的氧化损伤和离子毒害,以 12 ~ 16 mg/kg 土用量最为适宜。

参考文献:

- [1] 孙娟娟,张英俊. 植物对盐分空间不均匀分布的形态和生理响应研究进展[J]. 生态学报,2017,37(23):7791-7798.
- [2] 肖爽,韩雨辰,号宇然,等. 聚乙二醇引发对盐胁迫下棉种萌发及生理特性的影响[J]. 核农学报,2021,35(1):202-210.
- [3] 李彦,史衍玺,张英鹏,等. 盐胁迫条件下硒对小白菜抗氧化活性及膜脂过氧化作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4):749-753.
- [4] 石婧,刘东洋,张风华. 棉花幼苗对盐胁迫的生理响应与耐盐机理[J]. 浙江农业学报,2020,32(7):1141-1148.
- [5] Higbie S M, Wang F, Stewart J M, et al. Physiological response to salt (NaCl) stress in selected cultivated tetraploid cottons [J]. International Journal of Agronomy,2010,2010:643475.
- [6] 热依麦阿依·阿布都艾尼,陈静,陈芸,等. 盐胁迫下棉花根系的转录组分析及耐盐基因筛选[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(5):85-92.
- [7] 陈义珍,董合忠. 棉花衰老和熟相形成的生理生态与调控研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(2):643-651.
- [8] Gu S H, Evers J B, Zhang L Z, et al. Modelling the structural response of cotton plants to mepiquat chloride and population density [J]. Annals of Botany,2014,114(4):877-887.
- [9] 杨修一,于起庆,耿计彪,等. 包膜含缩节胺氯化钾对棉花产量及土壤钾素的影响[J]. 土壤学报,2020,57(6):1439-1448.
- [10] Yang F Q, Du M W, Tian X L, et al. Plant growth regulation enhanced potassium uptake and use efficiency in cotton [J]. Field Crops Research,2014,163:109-118.
- [11] 黎芳,杜明伟,徐东永,等. 黄河流域不同密度及施氮量下增效缩节胺化学封顶对棉花生长、产量和熟期的影响[J]. 中国农业大学学报,2018,23(3):10-22.
- [12] de Almeida A Q, Rosolem C A. Cotton root and shoot growth as affected by application of mepiquat chloride to cotton seeds [J]. Acta Scientiarum Agronomy,2012,34(1):61-65.
- [13] 王宁,田晓莉,段留生,等. 缩节胺浸种提高棉花幼苗根系活力中的活性氧代谢[J]. 作物学报,2014,40(7):1220-1226.
- [14] Verma S, Mishra S N. Putrescine alleviation of growth in salt stressed Brassica juncea by inducing antioxidative defense system

- [J]. Journal of Plant Physiology,2005,162(6):669-677.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [16] 王雷山,Khan Aziz,黄颖,等. 棉花产量因主茎不同叶位叶绿素含量变化对播期和密度的响应[J]. 棉花学报,2017,29(2):186-194.
- [17] Onanuga A O, Jiang P G, Adl S. Effect of phytohormones, phosphorus and potassium on cotton varieties (*Gossypium hirsutum*) root growth and root activity grown in hydroponic nutrient solution [J]. Journal of Agricultural Science,2011,4(3):342-345.
- [18] Chen W P, Hou Z N, Wu L S, et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment [J]. Plant and Soil,2010,326(1):61-73.
- [19] 王庆惠,韩伟,侯银莹,等. 不同耐盐品种棉花根系主要指标对盐分胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2018,29(3):865-873.
- [20] 田雨,王方永,罗宏海,等. 增效缩节胺化学封顶对不同施氮量条件下棉花群体生长特征的影响[J]. 西北农业学报,2020,29(4):559-569.
- [21] 于起庆,耿计彪,杨玉坤,等. 控释含缩节胺氯化钾对棉花叶片生理及土壤钾素形态的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(6):147-153.
- [22] Chen J Q, Yang X Y, Geng J B, et al. Controlled-release potassium chloride containing mepiquat chloride improved bioavailability of soil potassium and growth of cotton plants [J]. Archives of Agronomy and Soil Science,2020,67(10):1-15.
- [23] 李军宏,王远远,夏军,等. 两个不同耐旱性棉花品种根系生理特性对干旱的响应[J]. 应用生态学报,2020,31(10):3453-3460.
- [24] 李文昊,王振华,朱延凯,等. 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(6):207-213.
- [25] 田晓莉,谭伟明,李召虎,等. DPC 与 DTA-6 复配对转基因抗虫棉根系功能的调控[J]. 棉花学报,2006,18(4):218-222.
- [27] 罗佳,侯银莹,程军回,等. 低磷胁迫下不同磷效率基因型棉花的根系形态特征[J]. 中国农业科学,2016,49(12):2280-2289.
- [28] Azizpour K, Shakiba M R, Sima N A K K, et al. Physiological response of spring durum wheat genotypes to salinity [J]. Journal of Plant Nutrition,2010,33(6):859-873.
- [29] 郑青松,刘友良. DPC 浸种提高棉苗耐盐性的作用和机理[J]. 棉花学报,2001,13(5):278-282.
- [30] 王汐妍,裴波音,刘玉姣,等. 盐胁迫对不同耐盐性棉花幼苗生长与生理及无机离子器官分布的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2017,43(3):273-280.
- [31] 王韬远,陶冶,夏德美,等. 外源喷施 1-甲基环丙烯(1-MCP)对于旱胁迫下芍药幼苗生长的影响及作用机理[J]. 江苏农业学报,2020,36(2):447-454.
- [32] 郑莎莎,孙传范,孙红春,等. 不同外源激素对花铃期棉花主茎叶生理特性的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(12):4383-4389.
- [33] Rout N P, Shaw B P. Salt tolerance in aquatic macrophytes: possible involvement of the antioxidative enzymes [J]. Plant Science,2001,160(3):415-423.