

盐碱胁迫对棉花生长和养分吸收的影响

郭家鑫,鲁晓宇,陶一凡,郭慧娟,侯振安,闵 伟

(石河子大学农学院资源与环境科学系,新疆 石河子 832061)

摘 要:选取棉花品种鲁棉研 24 号为研究对象,探究盐胁迫(CS,NaCl 含盐量为 4.43 g · kg⁻¹)和碱胁迫(AS, Na₂CO₃+NaHCO₃ 质量比 1 : 1,含盐量为 2.03 g · kg⁻¹)对棉花生长、生理和养分吸收的影响。结果表明:盐碱胁迫显著抑制棉花生长,与 CK 相比,CS 处理叶、茎、根的 K/Na 值分别降低 86.4%、9.2%和 75.0%,总生物量降低 57.5%,叶片 REC、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 PRO 含量分别增加 74.2%、211.7%、118.9%、9.0%、134.0%和 230.0%;AS 处理叶、茎、根的 K/Na 值分别降低 94.4%、91.7%和 84.5%,总生物量降低 58.8%,叶片 REC、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 PRO 含量分别增加 31.5%、208.3%、215.3%、12.4%、276.1%和 264.2%;CS 处理叶中 Na 含量提高 563.0%,N 含量提高 13.9%,P 含量降低 35.5%,K 含量降低 10.0%,Ca 含量降低 21.4%,Mg 含量降低 19.2%,S 含量降低 14.3%,Fe 含量提高 26.2%,Mn 含量提高 37.2%,Zn 含量提高 32.2%,Cu 含量降低 11.1%,B 含量提高 5.7%,Mo 含量提高 21.1%,Ni 含量降低 5.1%;AS 处理叶中 Na 含量提高 1 761.0%,N 含量降低 2.7%,P 含量降低 23.3%,K 含量提高 5.9%,Ca 含量降低 40.0%,Mg 含量降低 27.3%,S 含量降低 17.5%,Fe 含量提高 71.8%,Mn 含量提高 81.8%,Zn 含量提高 19.7%,Cu 含量提高 10.3%,B 含量降低 20.3%,Mo 含量提高 133.7%,Ni 含量提高 66.8%。棉花通过强化抗氧化酶系统和积累脯氨酸适应盐碱胁迫。盐胁迫下叶面喷施 N、P、K、Ca、Mg、S、B、Fe、Cu 和 Ni,碱胁迫下叶面喷施 N、P、Ca、Mg、S、Fe、Zn 和 B 可以缓解盐碱胁迫对养分吸收带来的不利影响。

关键词:棉花;盐胁迫;碱胁迫;抗氧化酶;养分吸收

中图分类号:S562 **文献标志码:**A

Effects of saline and alkaline stresses on growth and nutrient uptake of cotton

GUO Jiaxin, LU Xiaoyu, TAO Yifan, GUO Huijuan, HOU Zhenan, MIN Wei

(Department of Resources and Environmental Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832061, China)

Abstract: To examine the effects of saline alkali stress on nutrient uptake and transport of cotton and to provide reference for promoting cotton growth in saline alkali land through nutrient regulation, Luyanmian 24 was selected as the research object to analyze the effects of saline stress (CS, NaCl, salt content: 4.43 g · kg⁻¹) and alkaline stress (AS, Na₂CO₃+ NaHCO₃ mass ratio 1 : 1, salt content: 2.03 g · kg⁻¹) on cotton growth, physiology and nutrient uptake. The results showed that saline and alkaline stress significantly inhibited the growth of cotton. Compared with CK treatment, the K/Na value and total biomass of leaves, stems, and roots in CS treatment decreased by 86.4%, 9.2%, 75.0%, and 57.5% respectively, and the contents of REC, MDA, SOD activity, POD activity, CAT activity, and PRO of leaves in CS treatment increased by 74.2%, 211.7%, 118.9%, 9.0%, 134.0%, and 230.0% respectively. The K/Na ratio and total biomass of leaves, stems, and roots decreased by 94.4%, 91.7%, 84.5%, and 58.8%. The contents of REC, MDA, SOD activity, POD activity, CAT activity, and PRO of leaves in AS treatment increased by 31.5%, 208.3%, 215.3%, 12.4%, 276.1%, and 264.2% respectively. In CS treated leaves: Na content increased by 563.0%, N content increased by 13.9%, P content decreased by

35.5%, K content decreased by 10.0%, Ca content decreased by 21.4%, Mg content decreased by 19.2%, S content decreased by 14.3%, Fe content increased by 26.2%, Mn content increased by 37.2%, Zn content increased by 32.2%, Cu content decreased by 11.1%, B content increased by 5.7%, Mo content increased by 21.1% and Ni content decreased by 5.1%. In AS treated leaves: Na content increased by 1 761.0%, N content decreased by 2.7%, P content decreased by 23.3%, K content increased by 5.9%, Ca content decreased by 40.0%, Mg content decreased by 27.3%, S content decreased by 17.5%, Fe content increased by 71.8%, Mn content increased by 81.8%, Zn content increased by 19.7%, Cu content increased by 10.3%, B content decreased by 20.3%, Mo content increased by 133.7% and Ni content increased by 66.8%. Cotton adapted to saline and alkali stress by strengthening antioxidant enzyme system and accumulating proline. Foliar spraying of N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Cu and Ni under salt stress and foliar spraying of N, P, Ca, Mg, S, Fe, Zn and B under alkali stress could alleviate the adverse effects of salt and alkali stress on nutrient absorption.

keywords: cotton; saline stress; alkaline stress; antioxidant enzyme; nutrient uptake

土壤盐碱化是一种广泛的非生物胁迫,会降低作物的产量并降低农田的产出效率,已经成为生态环境和人类健康的主要威胁^[1-3]。全球受盐分影响的土地面积为 $1.13 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ^[4],约 25% 的耕地和 33% 的灌溉农业用地受土壤盐渍化的影响^[5]。我国现有盐碱土地资源 $3.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$,盐碱化的耕地面积约为 760 万 hm^2 ^[6],而新疆盐渍化现象尤为严重,盐渍化耕地占比已达到耕地总面积的 37.72%^[7]。同时新疆作为我国棉花主产区,棉花的种植面积占全国的 82.8%,尽管棉花属于中等耐盐作物,对盐分具有很高的耐性^[8],但其产量仍会受到盐碱胁迫的不利影响^[9]。盐胁迫会造成植物生理性干旱和离子毒害,降低作物的产量和质量^[10]。因此调控盐碱地棉花生长,提高盐碱地棉花产量十分重要。

盐碱胁迫下,植物体内不仅会积累大量 Na^+ 造成离子毒害,还会加剧离子竞争作用,限制棉花对其他营养元素的吸收和转运^[11],显著抑制棉花的生长^[12]。盐胁迫既抑制棉花对大量元素(氮、磷、钾、钙、镁、硫)的吸收,也限制对微量元素(铁、铜、锌、锰和硼等)的吸收^[13],这些元素除了是作物生长的营养物质外,还直接或间接影响作物耐盐性的各种生理代谢过程,虽然每种元素在作物生长中都有独特的生理功能,但每种元素的主要功能都是维持细胞内离子稳态^[14]。前期研究^[14]主要是通过离子组学和基因手段探究研究胁迫对棉花离子稳态的影响,研究发现在 NaCl 和 Na_2SO_4 胁迫下叶片中 *GhSOS1* 和 *GhNHX1* 的相对表达量显著增加,而在 $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$ 胁迫下,叶片中 *GhSOS1* 和 *GhNHX1* 的相对表达量降低,*GhSOS1* 和 *GhNHX1* 表达量的变化解释了不同类型盐碱胁迫下棉花钠离子积累机制,即 NaCl 和 Na_2SO_4 两种中性盐胁迫下棉花的离子稳态机制相同,但与 $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$ 碱

胁迫下的离子稳态机制不同。这为本研究奠定了一定的理论基础。

前期研究已经阐明盐碱胁迫下棉花的离子稳态机制,而植物耐盐本质上就是矿质营养的问题,需要从养分吸收的角度研究盐碱胁迫对棉花的影响。而中性盐胁迫下(NaCl 和 Na_2SO_4)棉花维持离子稳态的机制类似,所以本研究以棉花为对象,主要探究盐胁迫(NaCl)与碱胁迫($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$)对棉花生长和养分吸收的影响,采用 ICP-MS 技术测定盐碱胁迫下棉花根、茎和叶中各营养元素的含量,阐明盐碱胁迫对棉花大、中和微量元素吸收和转运的影响,为后期通过营养调控促进盐碱地棉花生长和提高产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

土柱试验于 2020 年在石河子大学玻璃温室进行。试验土壤采自石河子大学农学院试验站,为灌耕灰漠土,质地为壤土。土壤基础理化性质:有机质 $14.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $10.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $244 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试作物为棉花(鲁棉研 24 号)。

1.2 试验设计

盐碱类型及盐碱化程度的分类以鲍士旦^[15]的土壤农化分析为依据,将本试验设置 3 种类型:对照-非盐碱土壤、氯化钠盐土和碳酸钠+碳酸氢钠盐土(简称分别为 CK、CS 和 AS),每个处理重复 3 次。

在试验开始前,将供试土壤自然风干,碾碎后过 2 mm 筛,将 NaCl 和 $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$ (质量比 1 : 1)溶液分别加入供试土壤至饱和状态(对照加同体积去离子水),放置一个月使土壤达到平衡,至此形成供试盐渍土。再将处理后土壤风干、过筛,

取样测含盐量、电导率、pH 值。具体试验处理及土壤盐碱类型和盐碱化程度见表 1。

棉花土柱模拟试验用高 60 cm、直径 35 cm 的圆柱容器,底部密封;按容重 $1.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 分层装土 50 cm,每 10 cm 一层,每个土柱装风干土 60 kg。灌水方式为滴灌,毛管平铺在土柱上方,滴头固定在土柱顶中心位置,每个土柱由 1 个滴头供水,灌水量 $2.5\text{ L}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。2020 年 4 月 10 日播种,每个土柱播种 20 株,采用干播湿出,幼苗生长至 2 片真叶时,每个土柱定植 2 株棉花。为了保证充足的水分供应,试验期间采用滴灌的方式定期补充水分,使土壤含水量保持在田间持水量的 60%~80%。试验在播种后 60 d 结束。

1.3 样品采集与测定

在棉花苗期采集棉花植株样品,测定棉花生物量、根系形态、离子组含量、棉花主要耐盐(碱)生理指标(细胞膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和过氧化氢酶活性)。

生长指标测定:每个处理各取 3 株具有代表性的棉花植株,分成根、茎、叶 3 部分,在 105℃ 下杀青 30 min,之后在 70℃ 下烘干至恒重,称其干物质量。使用 Epson Expression 1600 扫描仪的灰阶模式进行扫描,用 Rhizome 系统处理 TIF 图像文件,测定指标为根长、根表面积、根体积,扫描后将根系烘干称量。叶片相对电导率(REC)采用电导仪法,丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[16]。

抗氧化酶活性和脯氨酸含量测定:超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑还原法^[17],过氧化物酶(POD),愈创木酚法^[18],过氧化氢酶(CAT)采用紫外吸收法^[19],脯氨酸(PRO)采用茚三酮法^[20]。

营养元素和 Na 离子测定:N 采用凯氏定氮法测定,Na、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Zn、Cu、B、Mo 和 Ni 采用 ICP-MS 测定。具体操作如下:定量称取 100 mg

左右的棉花样品,加入 1.5 ml 浓硝酸在 145℃ 电热板上加热去除部分有机质后蒸干,加入 1ml 浓硝酸密闭于消解罐,在 195℃ 恒温烘箱中消解 12 h,消解后蒸干,加入 0.5 ml 浓硝酸,0.5 ml 内标和 3 ml 去离子水,溶解均匀后,最后取 2 ml 溶解液用 18 MΩ 超纯水稀释至 10 ml;空白溶液为实验用去离子水代替样本同步进行前处理。采用 ICPMS 测定处理好的样品,上机检测先点燃等离子体,仪器调谐校准,通过后稳定 30 min,样本进样,检测后关闭等离子,清洗进样系统。

1.4 数据处理与分析

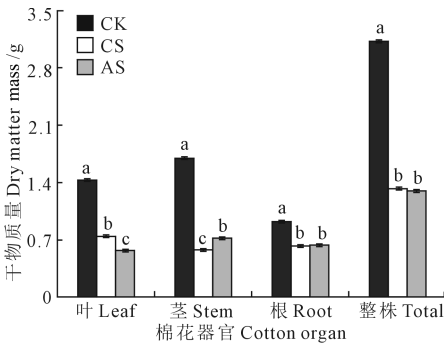
叶中养分积累分配系数计算公式^[21]:
叶片中元素累积量=叶中元素浓度×叶生物量
整株元素累积量=叶中元素浓度×叶生物量+茎中元素浓度×茎生物量+根中元素浓度×根生物量
叶中养分积累分配系数= 叶片中元素累积量/整株元素累积量×100%

数据处理和制图使用 Microsoft Excel 2016,使用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,差异显著性检验采用 Duncan’s 法。PCA 分析使用 Origin 2018 32Bit 软件分析。层序聚类分析采用 <http://www.metabo-analyst.ca/> 在线分析软件。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对棉花生物量的影响

盐碱胁迫显著抑制棉花生长(图 1),与 CK 处理相比,CS 处理叶、茎、根和总生物量分别降低 47.6%、65.7%、32.3%和 57.5%,AS 处理叶、茎、根和总生物量分别降低 60.1%、57.4%、31.2%和 58.8%。



注:不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平下差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at $P < 0.05$.

图 1 盐碱胁迫下棉花各器官干物质质量
Fig.1 Dry matter mass of cotton under saline and alkaline stress

表 1 不同处理土壤盐碱类型及盐碱化程度				
Table 1 Type and degree of saline and alkaline in soil under different treatments				
处理 Treatment	盐碱类型及 盐碱化程度 Saline and alkaline	含盐量 Salt content /(g · kg ⁻¹)	电导率 EC _{1:5} /(dS · m ⁻¹)	pH (1 : 2.5)
CK	非盐(碱)化 Non salting (alkalization)	0.53	0.17	8.16
CS	中度盐化(NaCl) Moderate salinization	4.43	1.39	8.43
AS	中度碱化(Na ₂ CO ₃ +NaHCO ₃) Moderate alkalization	2.03	0.63	9.92

2.2 盐碱胁迫对棉花叶片相对电导率和丙二醛含量的影响

盐碱胁迫下棉花叶片相对电导率和丙二醛(MDA)含量显著增加(图2),与CK相比,CS和AS处理棉花叶片相对电导率分别增加74.2%和31.5%;丙二醛含量分别增加211.7%和208.3%。

2.3 盐碱胁迫对棉花叶片抗氧化酶活性和脯氨酸含量的影响

盐碱胁迫下棉花叶片 SOD、POD、CAT 活性和 PRO 含量显著增加(图3),与CK相比,CS和AS处理下 SOD 活性分别增加118.9%和215.3%,POD 活性分别增加9.0%和12.4%,CAT 活性分别增加134.0%和276.1%,PRO 含量分别增加230.0%和

264.2%。
2.4 盐碱胁迫下棉花植株营养元素含量主成分分析

盐碱胁迫下棉花各器官营养元素含量的主成分分析如图4所示,盐胁迫、碱胁迫与对照之间能很好地被区分,第一主成分在叶、茎和根中的表现分别占总变异系数的64.5%、60.8%和65.6%。第一主成分的主要贡献元素在叶中为Na、Fe、Mo、Mn和Ca,茎中为Ca、S、Cu、N和Mn,根中为Mg、N、Fe、B和P。第二主成分在叶、茎和根中的表现分别占总变异系数的32.3%、29.4%和23.3%。第二主成分的主要贡献元素在叶中为N、Zn、P、K和Cu,茎中为Fe、B、Mg、K和Zn,根中为Cu、Ca、Zn、Mo和K。

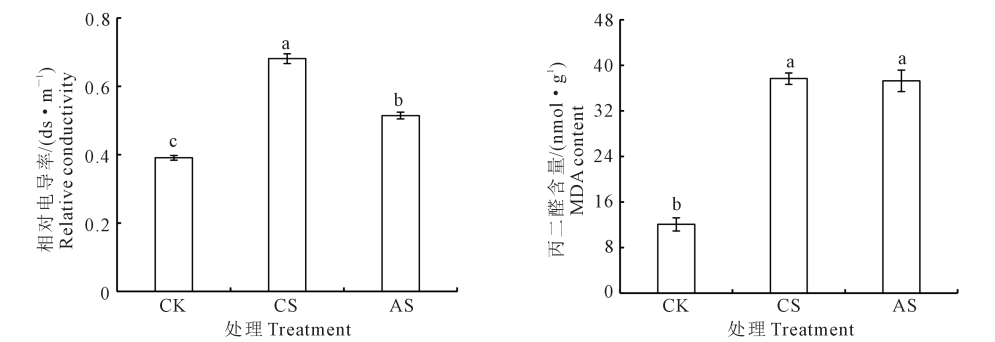


图2 盐碱胁迫对棉花叶片相对电导率和丙二醛含量的影响

Fig.2 Effects of saline and alkaline stress on REC and MDA content of cotton leaves

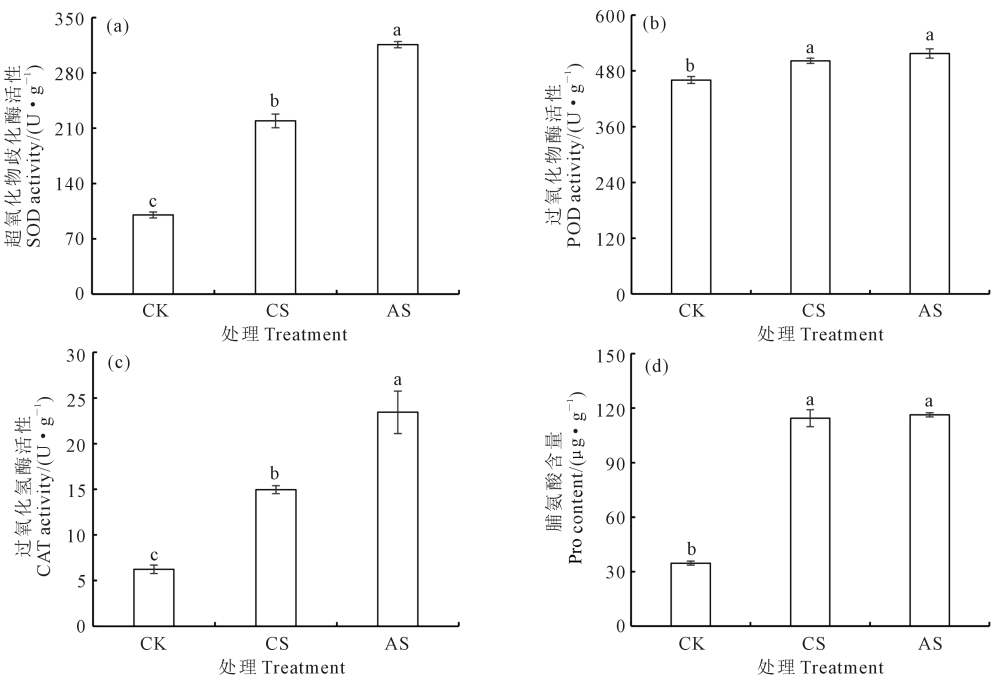


图3 盐碱胁迫对棉花叶片过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性和脯氨酸含量的影响

Fig.3 Effects of saline and alkaline stress on POD, SOD, CAT activities and Pro content of cotton leaves

2.5 盐碱胁迫下棉花钠离子含量与其他元素含量的相关性分析

盐碱胁迫下棉花各器官钠离子含量与其他元素含量的相关性如表 2 所示。盐胁迫下,叶片中 Mn、Zn、Mo、Fe、N 和 B 含量与 Na⁺ 含量呈正相关关系,茎中 Mo、Mn、Zn、Fe、K 和 Ni 含量与 Na⁺ 含量呈

正相关关系,根中 Zn、Mo、Mn、Cu、Mg、K、S 和 P 含量与 Na⁺ 含量呈正相关关系。碱胁迫下,叶中 S、Ni、Cu、B、Ca、N、Zn、K 和 Mg 含量与 Na⁺ 含量呈正相关关系,茎中 Mn、Mo、Zn、K、Ni 和 B 含量与 Na⁺ 含量呈正相关关系,根中 Mn、Mo、Mg、B、Ni、Cu 和 K 含量与 Na⁺ 含量呈正相关关系。

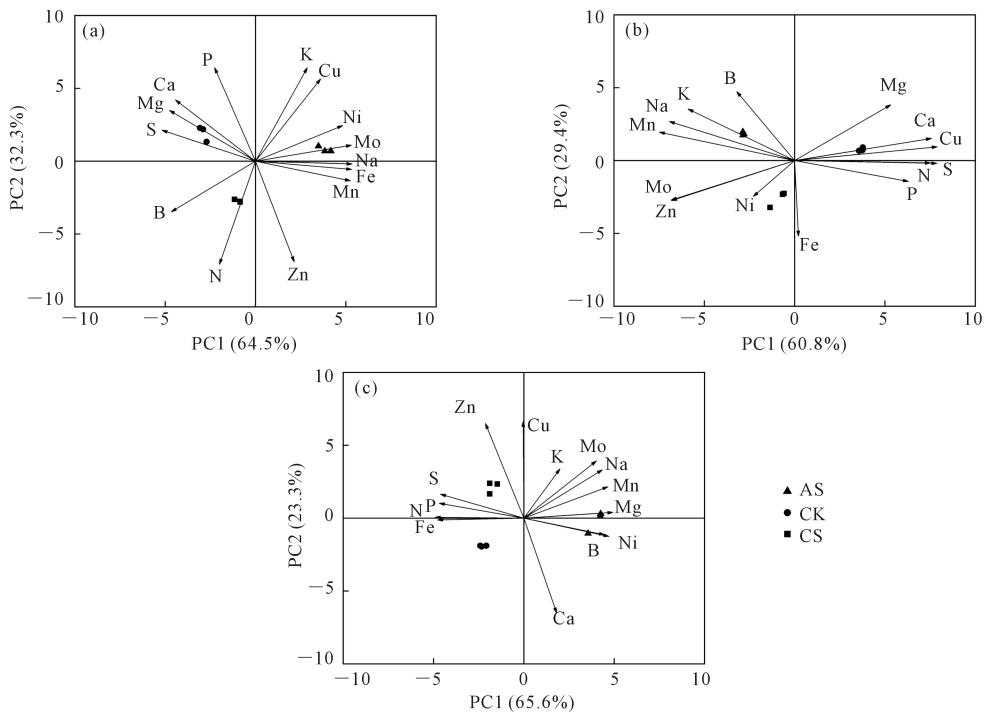


图 4 盐碱胁迫下棉花叶(a)、茎(b)和根(c)离子组主成分分析以及各元素对 PC1 和 PC2 的负荷
Fig.4 Principal component analysis of ion groups in leaves (a), stems (b) and roots (c) of cotton under saline alkaline stress and the load of elements on PC1 and PC2

表 2 盐碱胁迫下棉花叶、茎和根中 Na⁺ 含量与其他元素含量相关性分析

Table 2 Correlation analysis between Na⁺ content and other elements in leaves, stems and roots of cotton under saline alkaline stress

处理 Treatment	器官 Organ	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	Ni
CS	叶 Leaf	0.980 **	-0.899 *	-0.998 **	-0.990 **	-0.968 **	-0.957 **	0.989 **	1.000 **	1.000 **	-0.995 **	0.963 **	1.000 **	-0.284
	茎 Stem	-0.409	0.593	-0.885 *	-0.994 **	-0.992 **	-0.975 **	0.961 **	0.998 **	0.998 **	-0.999 **	-0.887 *	0.999 **	0.402
	根 Root	0.256	0.739	-0.807	-0.969 **	0.931 **	0.399	-0.505	0.976 **	0.996 **	0.936 **	-0.378	0.989 **	-0.410
AS	叶 Leaf	-0.710	-0.759	0.952 **	-0.996 **	-0.985 **	-0.983 **	0.997 **	1.000 **	1.000 **	0.991 **	-0.933 **	1.000 **	0.914 *
	茎 Stem	-0.988 **	0.990 **	-0.962 **	-0.998 **	-0.986 **	-0.987 **	-0.898 *	1.000 **	0.997 **	-0.989 **	0.956 **	0.999 **	0.967 **
	根 Root	-0.941 **	0.460	-0.998 **	-0.267	0.998 **	-0.972 **	-0.978 **	0.999 **	-0.167	0.512	0.978 **	0.999 **	0.881 *

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。
Note: **, at the level of 0.01 (two-tail), the correlation is significant; *, at the level of 0.05 (two-tail), the correlation is significant.

2.6 盐碱胁迫对棉花植株营养元素含量的影响

盐碱胁迫下棉花叶、茎和根中营养元素含量如表 3 所示。叶片中,与 CK 相比,CS 和 AS 的 Na 含量分别提高 564%和 1762%;在茎中,CS 和 AS 的 Na 含量分别提高 383%和 1684%;在根中,CS 和 AS 的 Na 含量分别提高 317%和 587%。在叶片中,与 CK 相比,CS 的 N 含量提高 13.9%,P 含量降低 35.5%,K 含量降低 10.0%;AS 的 N 含量降低 2.7%,P 含量

降低 23.3%,K 含量提高 5.9%。在茎中,与 CK 相比,CS 的 N 含量降低 6.2%,P 含量降低 21.9%,K 含量提高 0.6%;AS 的 N 含量 9.3%,P 含量降低 68.4%,K 含量提高 47.7%。在根中,与 CK 相比,CS 的 N 含量降低 3.9%,P 含量提高 6.5%,K 的含量提高 4.5%;AS 的 N 含量降低 40.0%,P 含量降低 74.2%,K 含量提高 6.2%。

在叶片中,与 CK 相比,CS 的 Ca 含量降低

21.4%,Mg 含量降低 19.2%,S 的含量降低 14.3%;AS 的 Ca 含量降低 40.0%,Mg 含量降低 27.3%,S 含量降低 17.5%。在茎中,与 CK 相比,CS 的 Ca 含量降低 26.4%,Mg 含量降低 20.7%,S 含量降低 9.5%;AS 的 Ca 含量降低 30.0%,Mg 含量降低 10.0%,S 含量降低 14.0%。在根中,与 CK 相比,CS 的 Ca 含量降低 14.2%,Mg 含量提高 5.3%,S 含量提高 3.0%;AS 的 Ca 含量降低 1.0%,Mg 含量提高 36.3%,S 含量降低 18.4%。

在叶片中,与 CK 相比,CS 的 Fe 含量提高 26.2%,Mn 含量提高 37.2%,Zn 含量提高 32.2%,Cu 含量降低 11.1%,B 含量提高 5.7%,Mo 含量提高 21.1%,Ni 含量降低 5.1%;AS 的 Fe 含量提高 71.8%,Mn 含量提高 81.8%,Zn 含量提高 19.7%,Cu 含量提高 10.3%,B 含量降低 20.3%,Mo 含量提高 133.7%,Ni 含量提高 66.8%。在茎中,与 CK 相比,CS 的 Fe 含量提高 27.9%,Mn 含量提高 41.9%,Zn 含量提高 36.4%,Cu 含量降低 16.7%,B 含量降低 11.8%,Mo 含量提高 56.9%,Ni 含量降低 12.4%;AS 的 Fe 含量降低 10.4%,Mn 含量提高 112.9%,Zn 含量提高 26.5%,Cu 含量降低 16.3%,B 含量提高 18.8%,Mo 含量提高 41.8%,Ni 含量提高 36.3%。在根中,与 CK 相比,CS 的 Fe 含量降低 2.7%,Mn 含量提高 32.3%,Zn 含量提高 53.3%,Cu 含量提高 4.5%,B 含量降低 2.5%,Mo 含量提高 33.5%,Ni 含量降低 3.1%;AS 的 Fe 含量降低 20.1%,Mn 含量提高 82.4%,Zn 含量降低 0.3%,Cu 含量提高 1.7%,B 含量提高 17.7%,Mo 含量提高 52.4%,Ni 含量提高 14.7%。

2.7 盐碱胁迫下棉花植株营养元素含量聚类分析

棉花叶片在 CS 处理下 N 含量升高,P 和 K 含量降低,AS 处理下 K 含量升高,P 和 K 含量降低(图 5a);茎在 CS 处理下 K 含量升高,N 和 P 含量降低,AS 处理下 K 含量升高,N 和 P 含量降低(图

5b);根在 CS 处理下 P 和 K 含量升高,N 含量降低,AS 处理下 K 升高,N 和 P 含量降低(图 5c)。

棉花叶片在 CS 处理下 Ca、Mg 和 S 含量降低,AS 处理下 Ca、Mg 和 S 含量降低(图 5a);茎在 CS 处理下 Ca、Mg 和 S 含量降低,AS 处理下 Ca、Mg 和 S 含量降低(图 5b);根在 CS 处理下 Mg 和 S 含量升高,Ca 含量降低,AS 处理下 Mg 含量升高,Ca 和 S 含量降低(图 5c)。

棉花叶片在 CS 处理下 Mn、Fe、Mo、Zn 和 B 含量升高,Cu 和 Ni 含量降低,AS 处理下 Cu、Mn、Fe、Mo、Ni 和 Zn 含量升高,B 含量降低(图 5a);茎在 CS 处理下 Mn、Zn、Mo、Fe 和 Ni 含量升高,Cu 和 B 含量降低,AS 处理下 B、Mn、Zn、Mo 和 Ni 含量升高,Cu 和 Fe 含量降低(图 5b);根在 CS 处理下 Mo、Mn、Zn 和 Cu 含量升高,B、Ni 和 Fe 含量降低,AS 处理下 Mo、Mn、B、Ni 和 Cu 含量升高,Fe 和 Zn 含量降低(图 5c)。

2.8 盐碱胁迫对棉花植株营养元素转运的影响

盐碱胁迫下棉花体内营养元素积累分配系数如表 4 所示。与 CK 相比,CS 的 N 分配系数提高 16.21%,P 分配系数提高 0.79%,K 分配系数提高 3.20%;AS 的 N 分配系数降低 0.34%,P 分配系数提高 57.20%,K 分配系数降低 21.26%。与 CK 相比,CS 的 Ca 分配系数提高 7.57%,Mg 分配系数提高 9.40%,S 分配系数提高 2.36%;AS 的 Ca 分配系数降低 10.07%,Mg 分配系数降低 18.92%,S 分配系数降低 3.42%。与 CK 相比,CS 的 Fe 分配系数提高 5.85%,Mn 分配系数提高 2.16%,Zn 分配系数提高 4.78%,Cu 分配系数 12.61%,B 分配系数提高 4.55%,Mo 分配系数降低 1.30%,Ni 分配系数降低 21.01%;AS 的 Fe 分配系数提高 17.66%,Mn 分配系数降低 4.54%,Zn 分配系数降低 7.46%,Cu 分配系数提高 2.21%,B 分配系数降低 9.82%,Mo 分配系数提高 8.74%,Ni 分配系数提高 1.61%。

表 3 盐碱胁迫下棉花叶、茎和根中各元素含量															
Table 3 Contents of elements in leaves, stems and roots of cotton under saline alkaline stress															
处理 Treatment	器官 Organ	Na	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	Ni
叶 Leaf	CK	1120.0c	38910b	2868.0a	19891b	56672a	11723a	21017a	237.60c	150.80c	58.00c	7.687b	196.70a	4.414c	0.5168b
	CS	7434.0b	44332a	1850.0b	17955c	44541b	9476b	18022b	299.80b	206.90b	76.63a	6.832c	207.90a	5.347b	0.4903b
	AS	20856.0a	37862b	2200.0a	20857a	33988c	8518c	17331b	408.20a	274.00a	69.45b	8.482a	156.80b	10.320a	0.8620a
茎 Stem	CK	713.9c	19859a	4233.0a	11728b	14148a	5927a	2829a	73.06b	13.83c	25.58c	7.032a	21.30b	1.599c	0.4748b
	CS	3451.0b	18626b	3305.0a	11792b	10408b	4698c	2560b	93.45a	19.63b	34.89a	5.861b	18.78c	2.509a	0.4159c
	AS	12733.0a	18020b	1338.0b	17320a	9908c	5335b	2433c	65.43c	29.45a	32.35b	5.882b	25.31a	2.267b	0.6474a
根 Root	CK	504.3c	12879a	1254.0a	7468a	3802a	1690c	1179a	263.20a	9.13c	15.42b	3.277b	10.32b	1.293c	0.4533b
	CS	2103.0b	12381b	1336.0a	7802a	3261b	1779b	1214a	256.10a	12.08b	23.64a	3.425a	10.07b	1.727b	0.4392b
	AS	3466.0a	7729c	323.2b	7931a	3762a	2303a	962b	208.20b	16.65a	15.36b	3.334ab	12.14a	1.971a	0.5198a

注:不同小写字母表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平
Note: Values followed by different letters between treatments are significantly different at $P<0.05$.

2.9 盐碱胁迫对棉花植株 K/Na 比的影响

盐碱胁迫下各器官的 K/Na 均显著降低(图 6)。在盐胁迫下叶、茎、根的 K/Na 分别下降86.4%、9.2%和 75.0%;碱胁迫下叶、茎和根的 K/Na 分别下降 94.4%、91.7%和 84.5%。

3 讨 论

3.1 盐碱胁迫对棉花生长的影响

棉花生长最能直观体现所受胁迫的状况^[22],本研究发现,盐碱胁迫显著抑制棉花生长,原因是盐胁

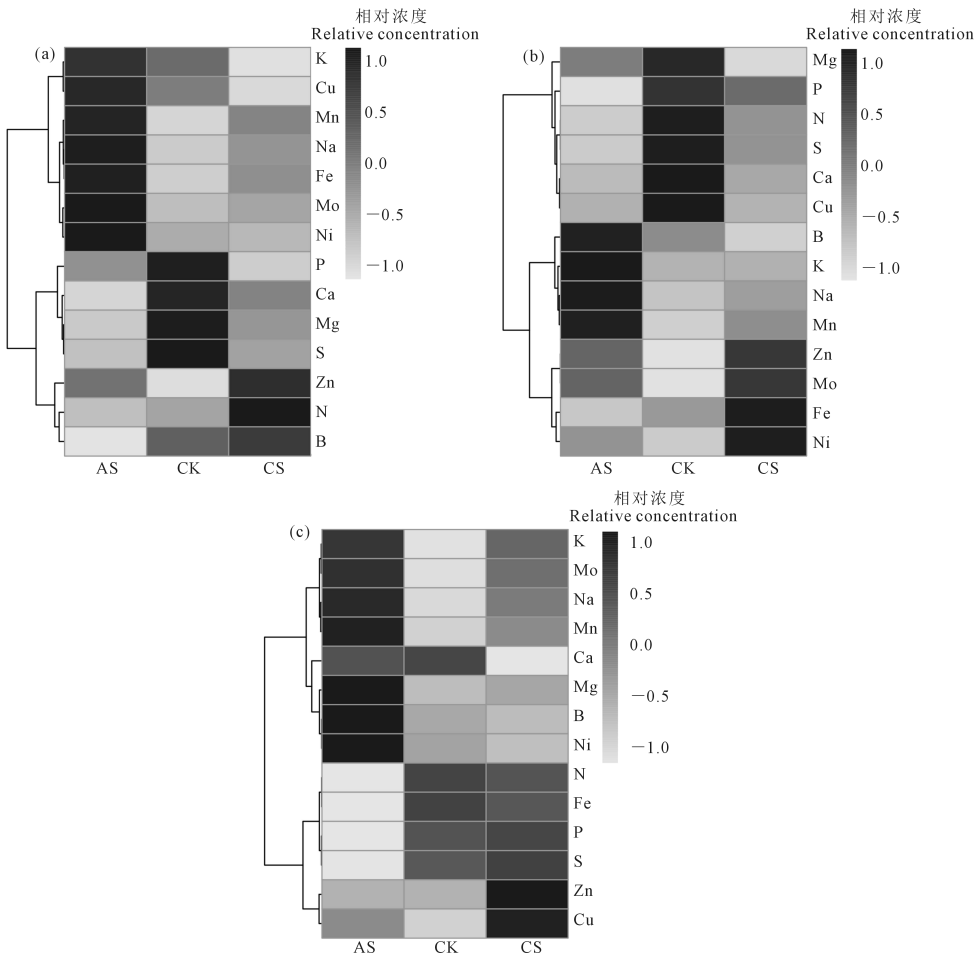


图 5 盐碱胁迫下棉花叶 (a)、茎 (b) 和根 (c) 相对浓度变化层次聚类分析

Fig.5 Hierarchical cluster analyses of relative concentrations of nutrient elements in leaf (a) , stem (b) and root (c) of cotton under saline alkaline stress

表 4 盐碱胁迫下棉花叶、茎和根中各元素积累分配系数

Table 4 Accumulation and distribution coefficients of elements in leaves, stems and roots of cotton under saline alkaline stress															
处理 Treatment	器官 Organ	Na	P	K	N	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	Ni
CK	根 Root	0.047	0.116	0.691	1.191	0.352	0.156	0.109	0.024	0.001	0.001	0.0003	0.001	0.0001	0.00004
	茎 Stem	0.121	0.717	1.985	3.362	2.395	1.003	0.479	0.012	0.002	0.004	0.0012	0.004	0.0003	0.00008
	叶 Leaf	0.160	0.411	2.849	5.573	8.117	1.679	3.01	0.034	0.022	0.008	0.0011	0.028	0.0006	0.00007
	整株 Whole palnt	0.328	1.243	5.525	10.13	10.863	2.839	3.598	0.071	0.025	0.014	0.0026	0.033	0.001	0.0002
	分配系数/% Partition coefficient	48.93	33.04	51.56	55.04	74.72	59.15	83.66	48.11	87.14	59.07	42.44	86.07	61.83	37.70
CS	根 Root	0.132	0.084	0.49	0.778	0.205	0.112	0.076	0.016	0.001	0.001	0.0002	0.001	0.0001	0.00003
	茎 Stem	0.201	0.192	0.686	1.083	0.605	0.273	0.149	0.005	0.001	0.002	0.0003	0.001	0.0002	0.00006
	叶 Leaf	0.554	0.138	1.338	3.303	3.318	0.706	1.343	0.022	0.015	0.006	0.0005	0.015	0.0004	0.00004
	整株 Whole plant	0.887	0.414	2.514	5.164	4.129	1.091	1.568	0.044	0.017	0.009	0.0011	0.017	0.0007	0.00012
	分配系数/% Partition coefficient	62.46	33.30	53.21	63.96	80.37	64.71	85.64	50.92	89.02	61.89	47.79	89.98	61.02	29.78
AS	根 Root	0.221	0.021	0.505	0.492	0.239	0.147	0.061	0.013	0.001	0.001	0.0002	0.001	0.0001	0.00003
	茎 Stem	0.916	0.096	1.246	1.296	0.713	0.384	0.175	0.005	0.002	0.002	0.0004	0.002	0.0002	0.00005
	叶 Leaf	1.197	0.126	1.197	2.173	1.951	0.489	0.995	0.023	0.016	0.004	0.0005	0.009	0.0006	0.00005
	整株 Whole plant	2.334	0.243	2.948	3.961	2.903	1.019	1.231	0.041	0.019	0.007	0.0011	0.012	0.0009	0.00013
	分配系数/% Partition coefficient	51.29	51.94	40.60	54.85	67.19	47.96	80.80	56.60	83.19	54.66	43.37	77.62	67.23	38.31

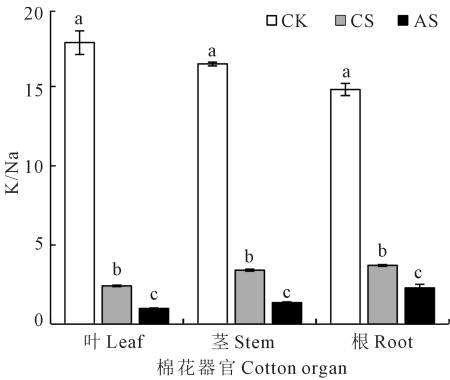


图 6 盐碱胁迫对棉花植株各器官 K/Na 的影响

Fig.6 Effects of saline alkaline stress on K/Na of cotton plant organs

胁迫下 Na^+ 毒害以及碱胁迫下高 pH 值影响了棉花营养代谢^[23-24]。盐胁迫以抑制茎生长为主,碱胁迫以抑制叶生长为主,盐碱胁迫对根系影响比对茎叶的影响小且无明显差异,这可能由于棉花在生长发育过程需要吸收积累大量盐分离子储存在液泡中,从而保持细胞液中正常的渗透势,所以 Na^+ 在地上部的积累量大于根系,因此盐碱胁迫对地上部抑制更明显。但有研究发现盐碱胁迫对植株根系生长的抑制作用大于对茎叶的抑制作用^[25],这可能是由于采样时期不同,棉花的幼嫩程度不一所导致的差异^[26]。

3.2 盐碱胁迫对棉花生理的影响

碱胁迫与盐胁迫相比,最明显的差异是高 pH 值带来的氧化胁迫,因此探究盐碱胁迫对棉花体内抗氧化系统的影响尤为重要,而丙二醛(MDA)的含量能够反映膜系统的受损程度^[27],本研究发现盐胁迫和碱胁迫下叶片丙二醛含量和相对电导率较对照显著增加,这是因为离子浓度升高会对细胞产生毒害作用,破坏酶、蛋白质以及细胞膜^[28]。盐胁迫下棉花叶片相对电导率显著大于碱胁迫,表明盐胁迫对细胞膜通透性的伤害大于碱胁迫,盐碱胁迫下丙二醛含量无明显差异,表明 ROS 对盐碱胁迫下的细胞膜伤害一样。SOD、POD、CAT 活性的增加能有效清除棉花体内活性氧,增强棉花的抗盐碱能力,碱胁迫处理下 SOD 和 CAT 的活性显著大于盐胁迫处理,随着 SOD 活性的提高,叶片清除氧自由基的能力增强;随着 CAT 活性的提高, H_2O_2 的清除能力增强^[29]。有研究表明植物体内抗氧化酶活性只在一定程度上发挥作用,当胁迫强度大于植物耐受能力时,抗氧化酶的活性下降,呈先上升后下降的趋势^[30],而本试验未设置不同 pH 值梯度,未能探明 SOD、CAT、POD 活性与 pH 值关系。

盐碱胁迫破坏了植物与土壤之间水势和离子含量的平衡,导致植物产生生理性缺水和养分缺失,棉花会通过调节离子的吸收转运和离子稳态以及积累有机渗透调节物质(如脯氨酸等)以提高耐盐性^[31],抵御盐胁迫。试验结果表明,盐碱胁迫下 PRO 含量显著高于对照,但是盐胁迫与碱胁迫之间没有显著差异,在盐碱胁迫下棉花会通过合成渗透调节物质(如脯氨酸等)启动自我保护机制。

3.3 盐碱胁迫对棉花养分吸收的影响

大量元素(N、P、K)不仅影响作物的产量,也在一定程度上影响作物耐盐性^[32],研究显示盐胁迫促进 P 和 K 吸收以及 N 转运,抑制 N 吸收以及 P 和 K 转运;碱胁迫促进 K 吸收和转运,抑制 N 和 P 吸收和转运。但从分配系数的角度分析,盐胁迫促进 N、P 和 K 转运,碱胁迫提高 P 转运,抑制 N 和 K 转运。K 能促进酶的活化,增强光合作用以及抗盐的能力,当外界环境中 Na^+ 浓度高于 K^+ 浓度时, Na^+ 离子通过竞争作用抑制植物对 K^+ 的吸收^[33]。 Na^+ 可以在结合位点取代 K^+ ,从而抑制植物的正常代谢,并且大多数植物在吸收 Na^+ 的同时会抑制 K^+ 向地上部分的运输^[34]。N 是提高作物产量所需的基本养分,但盐碱胁迫抑制了 N 的转运,同时胁迫条件下的高 pH 值使得 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收减少^[35]。P 能够减轻盐分对植物的不利影响,但是盐碱胁迫都抑制了 P 的转运。所以盐碱胁迫下叶面喷施 N、P 和 K 肥有助于缓解盐碱胁迫带来的危害。

Ca、Mg 和 S 作为植物生长所必须的中量元素,对调节植物生长起着至关重要的作用。盐胁迫促进 Mg 和 S 吸收,抑制 Mg 和 S 转运以及 Ca 吸收转运,碱胁迫促进 Mg 吸收,抑制 Mg 转运以及 Ca 和 S 吸收转运。但从分配系数的角度分析,盐胁迫促进 Ca、Mg 和 S 转运,碱胁迫降低 Ca、Mg 和 S 的转运。 Ca^{2+} 在盐碱胁迫下会对细胞膜机构起保护作用,阻止 K^+ 外流,减轻盐碱胁迫造成的损害^[36],但是 Ca^{2+} 与 Na^+ 具有一定的拮抗作用, Na^+ 过量摄入会导致棉花体内 Ca^{2+} 缺乏。盐碱胁迫的特性严重限制了 Ca^{2+} 的吸收,叶面喷施 Ca^{2+} 是解决 Ca^{2+} 供需矛盾的重要方法。Mg 主要用于叶绿素分子卟啉环头部结构的合成,从而促进植物进行光合作用,同时能够维持离子跨膜运输浓度梯度^[37]。S 存在于氨基酸半胱氨酸和甲硫氨酸中,是蛋白质和肽的重要成分^[38]。许多酶需要含硫辅酶和铁-硫簇辅基簇,这些辅基簇因其活性而在光合作用、呼吸作用、硫和氮代谢、植物激素和辅酶合成等重要过程中发挥作用^[39]。施用硫可以促进叶绿素、抗氧化酶如过氧化氢酶、

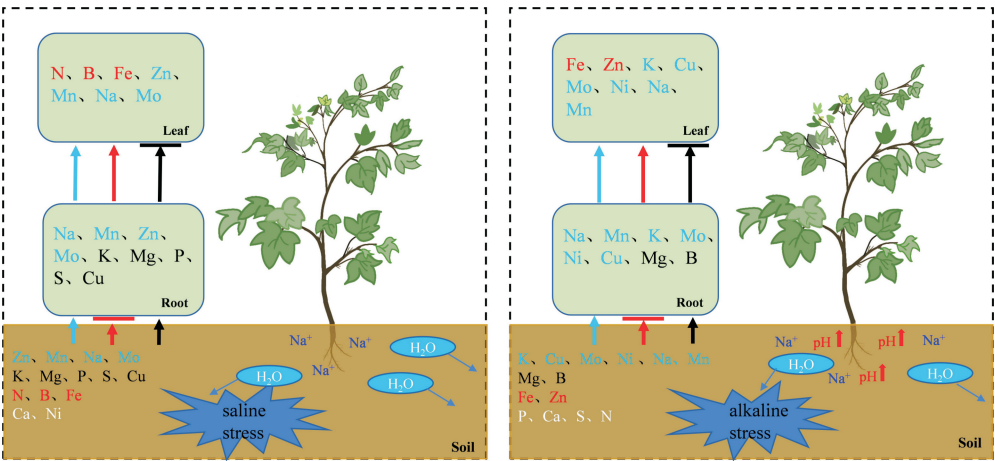
过氧化物酶和超氧化物歧化酶的合成^[40-41]。而盐胁迫抑制 Mg 和 S 转运以及 Ca 吸收转运,碱胁迫抑制 Mg 转运以及 Ca 和 S 吸收转运,因此盐碱胁迫叶面喷施 Ca、Mg 和 S 可以缓解盐碱胁迫对养分吸收带来的不利影响。

Fe、Mn、Cu、Zn、B、Mo 和 Ni 是植物生长所必须的微量元素,它们是植物酶或辅酶的组成部分,具有很强的特异性。盐胁迫促进 Cu 吸收,Fe 和 B 转运以及 Mn、Mo、Zn 吸收转运,抑制 B 和 Fe 吸收,Cu 转运以及 Ni 吸收转运;碱胁迫促进 B 吸收,Fe 和 Zn 转运,以及 Cu、Mn、Mo 和 Ni 吸收转运,抑制 Fe 和 Zn 吸收以及 B 转运。但从分配系数的角度分析,盐胁迫促进 Fe、Mn、Zn、Cu 和 B 转运,抑制 Mo 和 Ni 转运,碱胁迫促进 Fe、Cu、Mo 和 Ni 转运,抑制 Mn、Zn 和 B 转运。综上所述,盐胁迫对矿质养分吸收转运的影响总结为图 7。Mn 能参与光合作用中水的光解和电子传递,也能增加酶的活性,调节氮素代谢和体内氧化还原的过程。Zn 是植物体内合成蛋白质过程中多种酶的组分,还是多种酶的激活剂。施用 Zn 对受盐碱胁迫影响的植物具有改善作用^[42]。Cu 和 Fe 是超氧化物歧化酶的必需辅因子^[43],同时 Cu 参与许多重要的生物过程,包括光合作用、呼吸和氮代谢、乙烯感知、细胞壁重塑和细胞氧化还原状态的调节^[44]。Mo 能提高氧化酶的活性

也能维持叶绿素的正常结构,Mo 还是硝酸还原酶的主要成分,促进氮素的代谢,汤菊香等^[45]研究发现施用 Mo 会提高棉花的耐盐性,因此 Mo 对棉花耐盐碱性有一定的影响。Ni 是脲酶的组成成分,高等植物中的脲酶主要存在于叶片中,能促进对尿素的分解转化,同时还能增加 POD 和 APX 的活性从而提高棉花的抗氧化性。而盐胁迫抑制 Mo 和 Ni 转运,碱胁迫抑制 Mn、Zn 和 B 转运,因此盐胁迫叶面喷施 Mo 和 Ni,碱胁迫叶面喷施 Mn、Zn 和 B 可以缓解盐碱胁迫对养分吸收带来的不利影响。

4 结 论

盐碱胁迫显著抑制棉花生长,降低 K/Na 比;棉花通过强化抗氧化酶系统和积累脯氨酸适应盐碱胁迫。盐碱胁迫对大、中和微量元素的吸收转运的影响不同。盐胁迫抑制 N 吸收以及 P 和 K 转运,碱胁迫抑制 N 和 P 吸收和转运;盐胁迫抑制 Mg 和 S 转运以及 Ca 吸收转运,碱胁迫抑制 Mg 转运以及 Ca 和 S 吸收转运;盐胁迫抑制 B 和 Fe 吸收,Cu 转运以及 Ni 吸收转运;碱胁迫抑制 Fe 和 Zn 吸收以及 B 转运。因此,盐胁迫下叶面喷施 N、P、K、Ca、Mg、S、B、Fe、Cu 和 Ni,碱胁迫下叶面喷施 N、P、Ca、Mg、S、Fe、Zn 和 B 可以缓解盐碱胁迫对养分吸收带来的不利影响。



注:箭头表示相同颜色离子的传输方向,水平线表示传输受阻,白色字母表示植物吸收受到抑制。
Note: The arrow indicates the transport direction of ions of the same color, and the horizontal line indicates that the transport is blocked. White letters indicate that plant absorption is inhibited.

图 7 盐碱胁迫对棉花矿质养分吸收转运的影响

Fig.7 Effect of saline alkali stress on absorption and transport of mineral nutrients in cotton

参 考 文 献:

[1] WANG Q H, HAN W, HOU Y Y, et al. Responses of main characters of root system to salt stress among cotton varieties with different salt tolerance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 865-873.

[2] LI N, ZHENG H L, CUI J N, et al. Genome-wide association study and candidate gene analysis of alkalinity tolerance in japonica rice germplasm at the seedling stage[J]. Rice, 2019, 12(1): 24.

[3] ROLLY N K, IMRAN Q M, LEE I J, et al. Salinity stress-mediated suppression of expression of salt overly sensitive signaling pathway

- genes suggests negative regulation by AtbZIP62 transcription factor in *Arabidopsis thaliana*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(5): 1726.
- [4] WICKE B, SMEETS E, DORNBURG V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(8): 2669-2681.
- [5] SHRIVASTAVA P, KUMAR R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(2): 123-131.
- [6] 潘晶, 黄翠华, 罗君, 等. 盐胁迫对植物的影响及 AMF 提高植物耐盐性的机制[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4): 361-372.
- PAN J, HUANG C H, LUO J, et al. Effects of salt stress on plant and the mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi enhancing salt tolerance of plants[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(4): 361-372.
- [7] 田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7064-7068.
- TIAN C Y, MAI W X, ZHAO Z Y. Study on key technologies of ecological management of saline alkali land in arid area of Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7064-7068.
- [8] YUAN Y H, ZHONG M, DU N S, et al. Putrescine enhances salt tolerance of cucumber seedlings by regulating ion homeostasis[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 165: 70-82.
- [9] ZHU G Z, GAO W W, SONG X H, et al. Genome-wide association reveals genetic variation of lint yield components under salty field conditions in cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 23.
- [10] SHAHID S A, ZAMAN M, HENG L. Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2018: 43-53.
- [11] AZIZ I, KHAN M A. Experimental assessment of salinity tolerance of *Ceriops tagal* seedlings and saplings from the Indus delta, Pakistan [J]. Aquatic Botany, 2001, 70(3): 259-268.
- [12] 王宁, 杨杰, 黄群, 等. 盐胁迫下棉花 K^+ 和 Na^+ 离子转运的耐盐性生理机制[J]. 棉花学报, 2015, 27(3): 208-215.
- WANG N, YANG J, HUANG Q, et al. Physiological salinity tolerance mechanism for transport of K^+ and Na^+ Ions in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings under salt stress[J]. Cotton Science, 2015, 27(3): 208-215.
- [13] WU D Z, SHEN Q F, CAI S G, et al. Ionic responses and correlations between elements and metabolites under salt stress in wild and cultivated barley [J]. Plant & Cell Physiology, 2013, 54(12): 1976-1988.
- [14] GUO H J, HUANG Z J, LI M Q, et al. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21844.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2018: 178-179.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. The third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 178-179.
- [16] HODGES D M, DELONG J M, FORNEY C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. Planta, 1999, 207(4): 604-611.
- [17] 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.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [18] 张宪政. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.
- ZHANG X Z. Experimental techniques of plant physiology[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1994.
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [20] 张殿忠, 汪沛洪, 赵会贤. 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法[J]. 植物生理学通讯, 1990, (4): 62-65.
- ZHANG D Z, WANG P H, ZHAO H X. Determination of the content of free proline in wheat leaves[J]. Plant Physiology Communications, 1990, (4): 62-65.
- [21] 赵新华, 束红梅, 王友华, 等. 施氮量对棉铃干物质和氮累积及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 888-897.
- ZHAO X H, SHU H M, WANG Y H, et al. Effects of nitrogen fertilization on accumulation and distribution of dry weight and nitrogen of cotton bolls[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(4): 888-897.
- [22] ABBAS G, SAQIB M, AKHTAR J, et al. Interactive effects of salinity and iron deficiency on different rice genotypes[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178(2): 306-311.
- [23] YANG C W, CHONG J N, LI C Y, et al. Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1): 263-276.
- [24] LOKHANDE V H, NIKAM T D, PATADE V Y, et al. Effects of optimal and supra-optimal salinity stress on antioxidative defence, osmolytes and in vitro growth responses in *Sesuvium portulacastrum* L [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2011, 104(1): 41-49.
- [25] 李晓荣, 姚世响, 陈莎莎, 等. 黎异型性种子后代植株盐响应生理机制[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8139-8147.
- LI X R, YAO S X, CHEN S S, et al. Physiological responses to salt stress of plants derived from heteromorphic seeds of *Chenopodium album*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8139-8147.
- [26] 雷春英, 吉小敏, 彭钊植, 等. 不同类型盐分对盐爪爪种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1436-1441.
- LEI C Y, JI X M, PENG M Z, et al. Effects of sodium salinity stress types on the germination of *Kalidium foliatum* seeds and its young seedling growth[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1436-1441.
- [27] 王晓琪, 姚媛媛, 刘之广, 等. 宛氏拟青霉提取物对盐胁迫下水稻幼苗的生理适应性[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 98-105.
- WANG X Q, YAO Y Y, LIU Z G, et al. Effects of *Paecilomyces variotii* extracts on the physiological adaptability of rice seedlings under salt stress[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(1): 98-105.