

NaCl 胁迫对茄子幼苗生长和 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 分布的影响 及耐盐机理

张海军¹ 张娜¹ 杨荣超¹ 黄楹宇¹ 齐艳¹ 邢燕霞¹ 周春蕾¹ 张继宁^{2*} 郭仰东^{1*}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院/设施蔬菜生长发育调控北京市重点实验室,北京 100193;

2. 山西省农业科学院 蔬菜研究所,太原 030031)

摘要 以耐盐品种“多果多穗茄”及盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”为试验材料,通过测定不同浓度 NaCl 处理条件(0 和 150 mmol/L)茄子干鲜重,根、茎和叶中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 及 K^+/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ ,探讨了 NaCl 胁迫对茄子幼苗生长及 Na^+ 和 K^+ 吸收与分布的影响,并通过分析根、茎和叶不同器官中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 及 K^+/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 探讨了茄子幼苗的耐盐机理。结果表明:盐胁迫下,茄子幼苗干鲜重,根、茎和叶中 K^+ 和 Ca^{2+} 显著降低, Na^+ 含量显著升高。耐盐品种相对生物量积累高于盐敏感品种,根、茎和叶中 K^+ 及 K^+/Na^+ 显著高于盐敏感品种,盐敏感品种的 Ca^{2+} 和 Ca^{2+}/Na^+ 高于耐盐品种,盐敏感品种通过提高 Ca^{2+} 的利用率适应盐胁迫环境。NaCl 胁迫下,耐盐材料主要通过离子区隔化维持根系中较高的 K^+ 和 K^+/Na^+ ,同时叶片中贮存大量的 Na^+ 用以保持根系活力,从而提高茄子幼苗的耐盐性。

关键词 茄子; NaCl 胁迫; 离子分布; 耐盐机理

中图分类号 S 641.1

文章编号 1007-4333(2013)04-0077-07

文献标志码 A

Growth, ion distribution and salt-tolerance mechanism of eggplant seedlings under salt stress

ZHANG Hai-jun¹, ZHANG Na¹, YANG Rong-chao¹, HUANG Yun-yu¹, QI Yan¹,
XING Yan-xia¹, ZHOU Chun-lei¹, ZHANG Ji-ning^{2*}, GUO Yang-dong^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology/Beijing Key Laboratory of Growth and Developmental Regulation for
Protected Vegetable Crops, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Vegetables, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract The salt-tolerant eggplant “Duoguo Duosui” and salt-sensitive eggplant “Jiuye”, “Lanzhou Chang” were used for experiments. The fresh and dry weight, the contents of K^+ , Ca^{2+} , Na^+ and K^+/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ ratios in the roots, stems and leaves were measured. The purpose was to understand the effects and mechanism of NaCl stress on the growth of different eggplant varieties. Our data showed that the fresh and dry weights, contents of K^+ and Ca^{2+} in all cultivars were significantly decreased while Na^+ contents were increased. Salt-tolerant eggplant had higher relative biomass accumulations, K^+ contents and K^+/Na^+ ratios than the salt-sensitive ones. The Ca^{2+} contents and Ca^{2+}/Na^+ ratios were contrary to K^+ contents and K^+/Na^+ ratios, which might be due to the increase of Ca^{2+} absorption and utilization in salt-sensitive eggplants. In conclusion, the salt-tolerance mechanism of the salt-tolerant eggplants was to maintain a higher K^+ contents, K^+/Na^+ ratios in roots and Na^+ contents in leaves by ion compartmentation.

Key words eggplant; salt stress; ion distribution; salt-tolerance mechanism

收稿日期: 2013-01-07

基金项目: 国家“973”计划项目(2009CB119000); 中央高校基本科研业务费专项(2009-2-06)

第一作者: 张海军, 硕士研究生, E-mail: zhjcau2010@163.com

通讯作者: 张继宁, 副研究员, 主要从事蔬菜育种研究, E-mail: zh-jining@163.com;

郭仰东, 教授, 博士研究生导师, 主要从事植物生物技术研究, E-mail: yaguo@cau.edu.cn

茄子(*Solanum melongena* L., $2n=24$)是热带和亚热带地区非常重要的蔬菜作物,栽培广泛,历史悠久。印度和中国是最早驯化种植茄子的地方,因此是茄子的主要起源地^[1]。NaCl胁迫作为一种主要的非生物逆境因子,严重影响植物的生长。NaCl主要破坏植物细胞的水势和细胞体内离子平衡^[2]。据FAO统计,2010年,全世界土壤盐渍化土地超过9 300万 hm^2 ^[3]。更糟糕的是,由于气候因素的影响,20世纪土壤盐渍化面积仍有可能继续扩大^[4],严重影响农业的发展。如何利用大面积的盐渍化、荒漠化土地和丰富的咸水资源来发展蔬菜生产,已成为园艺科学迫切需要解决的重大课题。认识植物耐盐的作用机理,能够有的放矢地克服盐害,寻找提高植物耐盐性的途径和方法,对于促进作物的高产稳产,加强盐渍土的治理和综合利用具有重要意义^[5]。

在土壤盐渍化日益严重的今天,培育耐盐品种成为克服土壤盐渍化的最根本途径。过去几十年人们对盐碱地的开发利用已做了大量和艰苦的探索,但到目前为止尚没有取得突破性进展。原因是:1)传统的土壤改良土壤,投资大、效率低。2)培育抗盐作物品种,虽然科学家已经对耐盐植物小盐芥进行了测序,但人们对作物耐盐机理尚不完全清楚,对哪些基因或哪些代谢途径控制着作物耐盐性,以及耐盐基因在什么器官中表达等一系列基本问题尚待进一步研究。遗传学家和植物生理学家逐步达成共识,即首先弄清楚作物耐盐机理,有目的地进行抗盐育种^[6]。据报道,盐胁迫下,大麦组织中 K^+ 和 Na^+ 含量与植株生长有明显的关联^[7],茄子叶片中 Na^+ 含量明显上升, K^+ 含量和 K^+/Na^+ 离子比明显下降^[8]。在大麦和小麦中, K^+/Na^+ 离子比是衡量植株耐盐性强弱的重要指标,比值越高,耐盐性越强^[9-10]。前人研究表明“引茄”中 K^+ 和 Ca^{2+} 、 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比“杭茄”高,证明“引茄”耐盐性强于“杭茄”^[11],茄子嫁接苗比自根苗的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 更高,从而提高了耐盐性^[5,12],耐盐茄子愈伤组织中含有较高的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ^[13]。但关于盐胁迫对不同茄子生长和离子分布规律的影响及耐盐机理研究的报道极少,对于离子分布的组织特异性和含量与耐盐性的关系鲜有报道。本试验以耐盐品种“多果多穗茄”,盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”为试验材料,探究NaCl胁迫对茄子生长和离子分布的影响和耐盐离子机理,旨在为耐盐

品种的选育,找到克服盐害方法及分子改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

通过萌发期和幼苗期的多种指标进行耐盐性评价试验,从21份不同茄子品种中得到耐盐品种“多果多穗茄”和盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”(数据未给出),品种由山西省农业科学院提供。

1.2 方法

1.2.1 育苗

本试验在中国农业大学温室中进行,采用沙培法。将沙子反复冲洗干净,均匀放入塑料花盆中(高9 cm,直径10 cm,底部具孔,具托盘),每盆精确称量0.5 kg。茄子种子用1%~2% NaClO消毒,用去离子水冲洗3遍,常温浸种24 h,放入光照培养箱中催芽(30℃,黑暗)。将发芽的种子点播于装有沙子的花盆内,每盆3粒,放入温度为28~32℃的温室内培养,每隔一天浇一次1/2 Hoagland营养液,生长至四叶一心后开始处理。

1.2.2 NaCl处理

试验采用对照和150 mmol/L NaCl(溶解于Hoagland营养液中)2个处理,对照每隔一天浇一次Hoagland营养液,处理每隔一天浇一次含有NaCl溶液的Hoagland营养液,为防止NaCl应激反应,分3次加至预设浓度。第1次处理液NaCl浓度为50 mmol/L的Hoagland营养液,第2次为100 mmol/L,第3次为150 mmol/L,这时NaCl胁迫处理正式开始。处理时,每盘以浇透为标准,多余溶液从底部流出,并充满托盘为止。试验随机排列,每处理3次重复,处理2周。

1.2.3 测定内容及方法

试验处理2周后将植株用蒸馏水冲洗干净,吸干,分为根、茎和叶3个部分,待测。

1)生物量的测定

处理结束后,将植株取样,测定其鲜重(FW)。将根、茎和叶分别放入牛皮纸袋中,于105℃杀青10 min,然后65℃烘干至恒重,称量其干重(DW)。

2)样品的消化及离子含量的测定

参照Shi的方法^[14],将植物样品烘干,加液氮磨碎,分别称取根、茎和叶待测粉末0.25 g,放入消煮管中,加入5 mL优级纯浓 HNO_3 ,过夜后加入4 mL优级纯 H_2O_2 ,放入消煮炉中(CEM, Matthews,

NC, USA), 反应结束后将溶液用高纯水定容至 25 mL, 用电感耦合等离子质谱仪(ICP-AES, OPTIMA 3300 DV, Perkin - Elmer, USA)测定 K⁺、Na⁺和 Ca²⁺。试验设定 2 个空白。每个样品重复 3 次。并计算 K⁺/Na⁺和 Ca²⁺/Na⁺。

$$\frac{K^+}{Na^+} = \frac{K^+ / (\text{mmol/g})(\text{DW})}{Na^+ / (\text{mmol/g})(\text{DW})}$$

$$\frac{Ca^{2+}}{Na^+} = \frac{Ca^{2+} / (\text{mmol/g})(\text{DW})}{Na^+ / (\text{mmol/g})(\text{DW})}$$

2 结果与分析

2.1 NaCl胁迫对不同茄子幼苗生长的影响

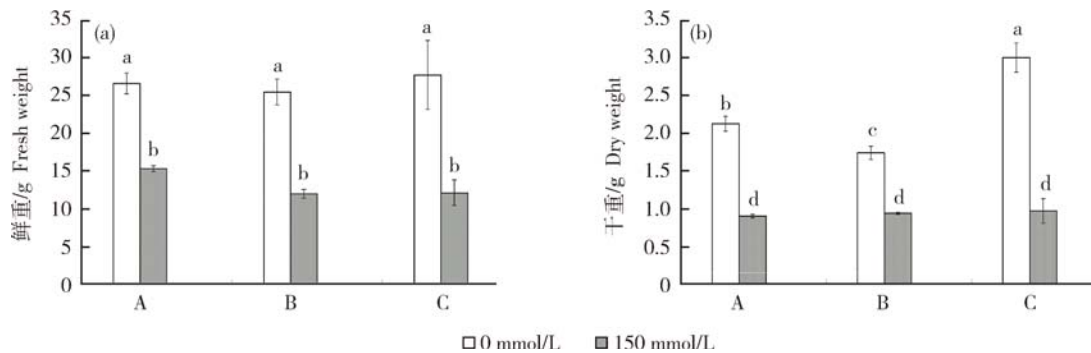
2.1.1 对不同茄子幼苗鲜重的影响

在对照条件下,耐盐品种“多果多穗茄”和盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”鲜重没有显著差异,但经 NaCl胁迫处理后,耐盐品种和盐敏感品种幼苗生物积累量与对照相比显著受到抑制($P < 0.05$)

(图 1(a))。NaCl胁迫下,“多果多穗茄”鲜重比“九叶茄”和“兰州长茄”高,达到 15.6 g,“九叶茄”和“兰州长茄”只有 12.0 和 12.1 g。与对照相比,“多果多穗茄”鲜重百分率为 57.5%,而“九叶茄”和“兰州长茄”只有 47.3%和 43.8%,耐盐品种相对生物量积累显著高于盐敏感品种。

2.1.2 对不同茄子幼苗干重的影响

与对照相比,NaCl胁迫显著抑制了不同茄子干物质的积累($P < 0.05$) (图 1(b))。在对照条件下,不同茄子品种间干重差异显著,盐敏感品种“兰州长茄”有最大的干重积累,达 2.99 g,而耐盐品种“多果多穗茄”只有 2.12 g,盐敏感品种“九叶茄”干重只有 1.73 g。但 NaCl胁迫下,不同茄子品种干重没有差异,干物质积累量一致。但与对照相比,盐敏感品种“九叶茄”有最高的干重百分率 54.3%,“多果多穗茄”和“兰州长茄”分别为 42.7%和 32.4%。品种间存在较大的差异。



$n=3$,不同字母表示差异显著水平($P < 0.05$)。图中横坐标大写字母 A 代表多果多穗茄, B 为九叶茄, C 为兰州长茄。下同。The data are means of 3 replicates \pm SD. Different letters in each column indicated significant differences at $P < 0.05$ level by ANOVA and Duncan's multiple range tests. Capital letters A, B, C on the abscissa represent Duoguo Duosui, Jiuye, Lanzhou Chang, respectively. The same as below.

图 1 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗鲜重(a)和干重(b)的影响

Fig. 1 Effect of salt stress on the fresh weight (a) and dry weight (b) of different eggplant variety seedlings

2.2 NaCl胁迫对不同茄子幼苗不同器官离子分布的影响

2.2.1 对Ca²⁺、K⁺及Na⁺分布的影响

无 NaCl胁迫时,不同品种根、茎和叶中 Ca²⁺的含量趋势是一致的,叶片中最高,根和茎次之。与对照相比,NaCl胁迫显著抑制了茎、叶中 Ca²⁺的吸收(图 2)。但在盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”的根中, Ca²⁺含量显著高于对照,说明 NaCl胁迫提高了盐敏感品种根对 Ca²⁺的利用率。NaCl胁迫下,耐盐品种“多果多穗茄”根、茎和叶中 Ca²⁺绝对含量与相对含量都低于盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长

茄”(图 2,表 1),说明盐胁迫下,盐敏感品种对 Ca²⁺利用率更高。

与 NaCl胁迫相比,对照条件下不同品种不同器官中 K⁺含量与 Ca²⁺含量略有差异,叶片和茎中含量略高于根中,且不同的品种不同器官含量存在差异。根系中耐盐品种“多果多穗茄”K⁺含量明显低于盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”,而在茎和叶中“九叶茄”K⁺含量最高。但经 NaCl胁迫处理后,盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”根、茎和叶中 K⁺含量显著下降($P < 0.05$) (图 3)。NaCl胁迫下,盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”根、茎和叶中

K⁺绝对含量与相对含量显著低于耐盐品种“多果多穗茄”(图3,表1)。从K⁺含量来看,根系是衡量耐盐的主要器官,盐胁迫下,耐盐品种与盐敏感品种根系中K⁺利用率差异最显著,耐盐品种相对含量为0.80,而盐敏感品种仅为0.26和0.18(表1),其次是茎,最后是叶片。

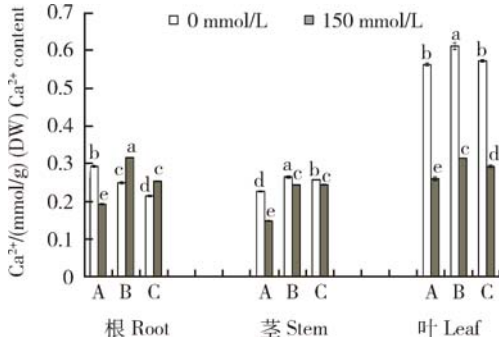


图2 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根、茎和叶中Ca²⁺的影响

Fig. 2 Effect of salt stress on the Ca²⁺ content in root, stem and leaf of different eggplant variety seedlings

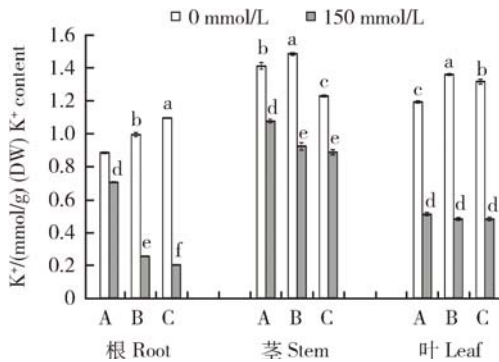


图3 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根、茎及叶中K⁺的影响

Fig. 3 Effect of salt stress on the K⁺ content in root, stem and leaf of different eggplant variety seedlings

对照条件下,与K⁺和Ca²⁺不同,耐盐品种“多果多穗茄”根、茎和叶中Na⁺都显著高于盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”,且根系中含量最高,茎次之,叶片中含量最低。NaCl胁迫处理后,根、茎和叶中Na⁺含量较对照显著升高(P<0.05)(图4)。NaCl胁迫下,不同品种相同器官中Na⁺含量不同,根系中耐盐品种含量高,茎和叶中盐敏感含量较高,但Na⁺相对含量耐盐品种低于盐敏感品种(表1),

说明耐盐品种吸收较少比率的NaCl,提高抗盐能力;从Na⁺分布来看,无论哪个品种,NaCl胁迫处理后,叶片是Na⁺主要的吸收器官,所有品种较对照平均提高130倍以上,茎中16倍,根中仅8倍(表1),说明NaCl胁迫下,叶片贮存大量的Na⁺,减轻根系的压力,优先保证根系正常生长。

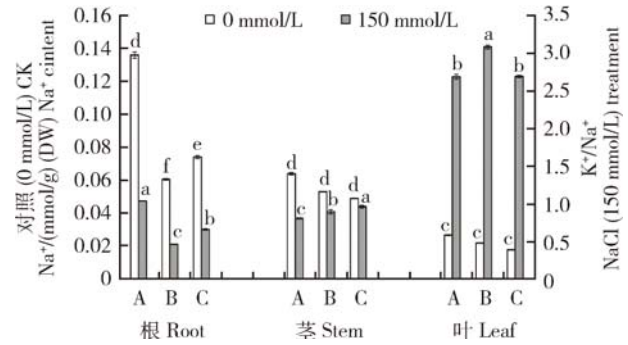


图4 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根、茎及叶中Na⁺的影响

Fig. 4 Effect of salt stress on the Na⁺ content in root, stem and leaf of different eggplant variety seedlings

2.2.2 NaCl胁迫对Ca²⁺/Na⁺及K⁺/Na⁺的影响

正常生长条件下,无论根、茎和叶,耐盐品种“多果多穗茄”Ca²⁺/Na⁺明显低于盐敏感品种。从离子分布来看,各个品种叶片中的Ca²⁺/Na⁺显著高于根和茎,说明对照条件下,叶片是Ca²⁺作用的主要场所。NaCl胁迫处理后,各个品种根、茎和叶中Ca²⁺/Na⁺显著下降,平均分别下降了8、19和263倍以上(P<0.05)(图5,表2)。NaCl胁迫下,耐盐品种“多果多穗茄”根、茎和叶中Ca²⁺/Na⁺均低于

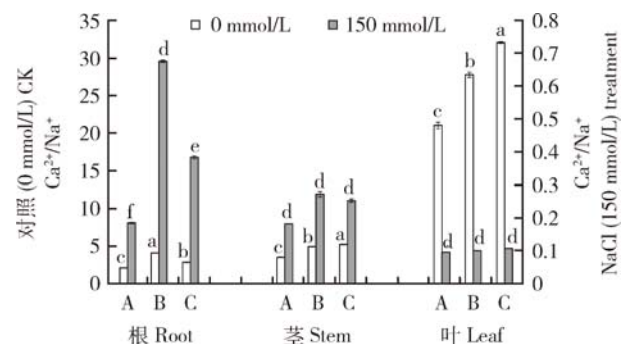


图5 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根、茎及叶中Ca²⁺/Na⁺的影响

Fig. 5 Effect of salt stress on the Ca²⁺/Na⁺ content in root, stem and leaf of different eggplant variety seedlings

盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”,但与对照相比,其叶片相对 Ca^{2+}/Na^+ 高于“九叶茄”和“兰州长茄”(表2)。

对照条件下,与 Ca^{2+}/Na^+ 比值相似,无论根、茎和叶,耐盐品种“多果多穗茄” K^+/Na^+ 比值明显低于盐敏感品种。从离子分布来看,各个品种叶片中的 K^+/Na^+ 比值显著高于根和茎。NaCl胁迫处理后,各个品种根、茎和叶 K^+/Na^+ 比值较对照显著下降($P<0.05$)(图6),平均下降29、23和347倍(表2)。NaCl胁迫下,无论根、茎和叶,耐盐品种“多果多穗茄”比盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”有较高的绝对 K^+/Na^+ 比值和相对 K^+/Na^+ 比值(表2)。

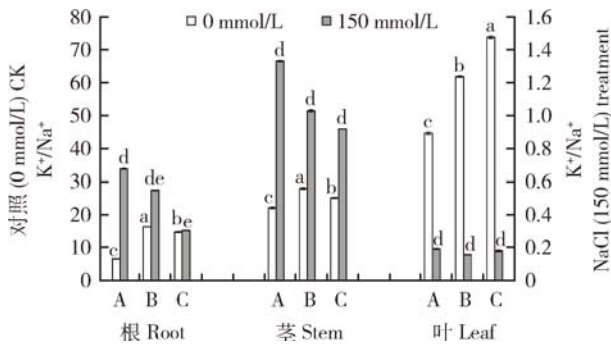


图6 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根、茎及叶中 K^+/Na^+ 的影响

Fig. 6 Effect of salt stress on the K^+/Na^+ content in root, stem and leaf of different eggplant variety seedling

3 讨论与结论

有关NaCl胁迫对茄子生长和离子分布规律的研究已有相关报道^[5,11]。但前人的工作研究的是嫁接茄子砧木离子的分布规律和通过离子分布规律进行茄子耐盐的鉴定,并未对不同器官离子含量进行分析进而指出其耐盐机理,NaCl胁迫对不同耐盐茄子幼苗生长和离子分布规律及耐盐机理的研究鲜有报道。本研究表明,NaCl胁迫后,各个品种茄子幼苗生物量积累显著下降,与前人研究结果一致。在对照条件下,耐盐品种“多果多穗茄”和盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”鲜重没有差异,但干重存在较大差别(图1),表明存在基因型差异。相反,在NaCl胁迫下,各个品种的生物量积累没有太大差异,耐盐品种并没有表现出很高的生物量积累,但与对照相比,耐盐品种“多果多穗茄”有较高的相对鲜

重百分率和相对干重百分率。因此,不同基因型的品种,表现型存在较大差异。本研究的数据表明,在NaCl胁迫下,鉴于基因型的影响,不同耐盐性的茄子幼苗,其耐盐性取决于其相对生物量积累的高低。

NaCl胁迫的主要影响在于破坏了植物体内水势和离子平衡^[2],进而引起作物减产甚至死亡^[15]。本试验中,NaCl显著抑制了茄子幼苗 Ca^{2+} 和 K^+ 的吸收(图2和3)。 Ca^{2+} 不仅是植物必需的营养元素, Ca^{2+} 作为植物信号传导中第二信使,也是植物代谢和发育的调节者。从图2可以看出,NaCl胁迫下,盐敏感品种“九叶茄”、“兰州长茄”根系中 Ca^{2+} 含量较对照有所增加,这与前人结果一致^[16]。在NaCl胁迫下,盐敏感品种根系对 Ca^{2+} 的利用率增加,可能是吸收增加或叶片与茎中的 Ca^{2+} 回流。 Ca^{2+} 可以通过不同的途径如SOS途径、MAPK途径等降低植物本身 Na^+ 的含量,维持细胞的渗透压和水势降低盐胁迫对植物体的伤害^[17],同时与细胞内的脱落酸、活性氧物质等一起参与植物抗逆性的信号传递和表达^[16],这或许是盐胁迫下盐敏感品种生物量积累与耐盐品种差异不明显的原因。

K^+ 是高等植物体内含量最多的阳离子,具有调控离子平衡、渗透调节、蛋白质结合、细胞膨压和光合作用等生理功能,保持高 K^+ 低 Na^+ 的吸收是一般作物耐盐的标志^[18]。从图3和表1可以看出,盐胁迫下,无论根、茎和叶,耐盐品种“多果多穗茄”都比盐敏感品种“九叶茄”和“兰州长茄”有较高的绝对和相对 K^+ 含量,差异显著。然而,在根系中耐盐品种 Na^+ 含量虽然高于盐敏感品种,但相对含量低于盐敏感品种(表1),茎和叶中与 K^+ 含量一致(图4)。从分布来看,NaCl胁迫下,根、茎和叶中 K^+ 显著减少且 Na^+ 显著增加,但根和茎比叶片中保有更多的 K^+ 和更少的 Na^+ ,叶片作为 Na^+ 的主要贮存器官,吸收了大部分的 Na^+ ,通过离子区隔化优先保证根系的生长,这与玉米^[19]、小麦^[20]和 大豆^[21]根系为 Na^+ 主要吸收器官结果相反,与白三叶幼苗^[22]研究相符。

NaCl胁迫下, K^+/Na^+ 是一个组织水平上重要的耐盐指标,一般来说, K^+/Na^+ 越高,植株耐盐性越强^[9,23]。本研究中,不同部位 K^+/Na^+ 差别较大,总体来看,NaCl胁迫下,各器官 K^+/Na^+ 显著下降,耐盐品种显著高于盐敏感品种,与前人结果相符^[24-25]。但根和茎中 K^+/Na^+ 最高,叶最低(图6)。与 K^+/Na^+ 趋势相似,NaCl胁迫下, Ca^{2+}/Na^+ 显著

表1 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根及茎与叶中Ca²⁺、K⁺及Na⁺相对含量的影响

品种 Variety	根 Root			茎 Stem			
	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
A	0.66±0.01 c	0.80±0.00 a	7.62±0.10 b	0.65±0.01 b	0.76±0.01 a	12.62±0.01 c	0.46±0.01 b
B	1.26±0.01 a	0.26±0.00 b	7.65±0.05 b	0.92±0.01 a	0.62±0.01 c	16.87±0.61 b	0.51±0.01 a
C	1.19±0.01 b	0.18±0.00 c	8.93±0.22 a	0.95±0.01 a	0.72±0.01 b	19.68±0.46 a	0.51±0.01 a

注: n=3, 同列数据后不同的字母表示组间显著水平 P<0.05。下同。

Note: The data are means of 3 replicates ±SD. Different letters in each column indicated significant differences at P<0.05 level by ANOVA and Duncan's multiple

表2 NaCl胁迫对不同茄子品种幼苗根、茎及叶中K⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺的影响

内容 Contents	品种 Varieties	根 Root			茎 Stem			
		对照 Control	NaCl处理 NaCl stress	对照/NaCl处理 Control/NaCl stress	对照 Control	NaCl处理 NaCl stress	对照/NaCl处理 Control/NaCl stress	
K ⁺ /Na ⁺	A	6.48±0.09 c	0.68±0.01 a	9.59	22.04±0.28 c	1.33±0.01 a	16.55	44.61±0.44 c
	B	16.37±0.04 a	0.55±0.01 b	29.86	27.93±0.24 a	1.03±0.00 b	27.17	61.85±0.19 b
	C	14.76±0.21 b	0.30±0.00 c	48.47	25.06±0.20 b	0.92±0.00 c	27.29	73.80±0.44 a
Ca ²⁺ /Na ⁺	A	2.14±0.01 c	0.18±0.002 c	11.54	3.53±0.05 c	0.18±0.001 b	19.31	21.02±0.45 c
	B	4.11±0.02 a	0.68±0.004 a	6.07	4.96±0.06 b	0.27±0.009 a	18.20	27.77±0.34 b
	C	2.89±0.05 b	0.38±0.005 b	7.53	5.26±0.04 a	0.25±0.005 a	20.75	32.06±0.12 a

下降,根和茎中比值显著高于叶片,但 Ca^{2+}/Na^+ 耐盐品种比盐敏感品种要低,但盐敏感品种通过提高根中 Ca^{2+} 的利用率(图2和表1),提高细胞膜稳定性,保证 Ca^{2+} 信号途径,缓冲NaCl胁迫的影响,提高干物质量的积累。

本试验研究表明,NaCl胁迫下,茄子幼苗通过对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 进行区隔化,提高盐胁迫适应性。叶片是 Na^+ 主要的贮存器官,吸收大部分的 Na^+ ,减轻根系的压力,优先保证根系中 K^+ 和 Ca^{2+} 的利用。与盐敏感品种相比,耐盐品种始终保持较高的 K^+/Na^+ 比值,且以根系中为主,这是耐盐品种茄子幼苗耐盐的主要机制。与 K^+/Na^+ 比值相反,盐敏感品种有更高的 Ca^{2+}/Na^+ (图5),也许盐敏感品种通过提高根系中 Ca^{2+} 吸收或者叶片,茎中的 Ca^{2+} 通过韧皮部回流提高NaCl胁迫下 Ca^{2+} 利用率达到适应盐胁迫环境,积累较多的生物量,这也许是干物质积累差异不明显的原因,其相关机制仍不明确,需进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Meyer R S, Karol K G, Little D P, et al. Phylogeographic relationships among Asian eggplants and new perspectives on eggplant domestication[J]. Mol Phylogenet Evol, 2012, 63(3): 685-701
- [2] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends Plant Sci, 2001, 6(2): 66-71
- [3] FAO. FAO land and plant nutrition management service[DB/OL]. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>, 2010
- [4] 曾洪学, 王俊. 盐害生理与植物抗盐性[J]. 生物学通报, 2005, 40(9): 1-3
- [5] 魏国平, 朱月林, 刘正鲁, 等. NaCl胁迫对茄子嫁接苗生长和离子分布的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(6): 1172-1178
- [6] 王宝山, 赵可夫, 邹琦. 作物耐盐机理研究进展及提高作物抗盐性的对策[J]. 植物学通报, 1997, 14: 25-30
- [7] Kronzucker H J, Szczerba M W, Schulze L M, et al. Non-reciprocal interactions between K^+ and Na^+ ions in barley (*Hordeum vulgare* L)[J]. J Exp Bot, 2008, 59(10): 2793-2801
- [8] Unlukara A, Kurunc A, Kesmez G D, et al. Effects of salinity on eggplant (*Solanum melongena* L.) growth and evapotranspiration[J]. Irrig Drain, 2010, 59(2): 203-214
- [9] Genc Y, McDonald G K, Tester M. Reassessment of tissue Na^+ concentration as a criterion for salinity tolerance in bread wheat[J]. Plant Cell Environ, 2007, 30(11): 1486-1498
- [10] Flowers T J, Hajibagheri M A. Salinity tolerance in *Hordeum vulgare*: Ion concentrations in root cells of cultivars differing in salt tolerance[J]. Plant Soil, 2001, 231(1): 1-9
- [11] 赵先军, 傅庆林, 丁能飞, 等. 盐胁迫对两种茄子的生长和离子吸收的影响[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(3): 186-189
- [12] 吴雪霞, 查丁石, 朱宗文, 等. NaCl胁迫对嫁接茄子幼苗光合作作用和离子含量的影响[J]. 上海农业学报, 2012, 28(3): 13-16
- [13] Yasar F, Ellialtioglu S, Kusvuran S. Ion and lipid peroxide content in sensitive and tolerant eggplant callus cultured under salt stress[J]. Eur J Horticult Sci, 2006, 71(4): 169-172
- [14] Shi R L, Zhang Y Q, Chen X P, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. J Cereal Sci, 2010, 51(1): 165-170
- [15] Albino Maggio, S D P, Massimo Fagnano, et al. Saline agriculture in Mediterranean environments[J]. Ital J Agron, 2011, 6: 36-43
- [16] 景艳霞, 袁庆华. NaCl胁迫对苜蓿幼苗生长及不同器官中盐离子分布的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 134-139
- [17] 王芳, 万书波, 孟庆伟, 等. Ca^{2+} 在植物盐胁迫响应机制中的调控作用[J]. 生命科学研究, 2012, 16(4): 362-367
- [18] Shannon M C, Grieve C M. Tolerance of vegetable crops to salinity[J]. Sci Horticult-Amsterdam, 1999, 78(1/2/3/4): 5-38
- [19] 江行玉, 宋杰, 范海, 等. 外源钙和亚精胺对NaCl胁迫条件下玉米幼苗体内离子平衡和多胺水平的调节[J]. 植物生理学报, 2000, 26(6): 539-544
- [20] 杨洪兵, 陈敏, 王宝山. 小麦幼苗拒 Na^+ 部位的拒 Na^+ 机理[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28(3): 181-186
- [21] 於丙军, 罗庆云, 刘友良. 盐胁迫对盐生野大豆生长和离子分布的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(1): 39-44
- [22] 徐威, 袁庆华, 王瑜, 等. 盐胁迫下白三叶幼苗离子分布规律的初步研究[J]. 中国草地学报, 2011, 33(5): 33-39
- [23] Chen Z H, Zhou M X, Newman I A, et al. Potassium and sodium relations in salinised barley tissues as a basis of differential salt tolerance[J]. Funct Plant Biol, 2007, 34(2): 150-162
- [24] Asch F, Dingkuhn M, Dorffling K, et al. Leaf K^+/Na^+ ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice [J]. Euphytica, 2000, 113(2): 109-118
- [25] Maathuis F J M, Amtmann A. K^+ nutrition and Na^+ toxicity: The basis of cellular K^+/Na^+ ratios[J]. Ann Bot-london, 1999, 84(2): 123-133

责任编辑: 王燕华