NaCl 胁迫对玉米幼苗不同器官离子含量的影响*

王玉凤[1] 薛盈文[1] 杨克军[1] 王庆祥[2**]
([1]黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319;[2]沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161)

摘 要 在实验室水培条件下,研究了 NaCl 胁迫下玉米幼苗不同器官中 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}和 Cl^-含量的变化。结果表明:玉米各个部分 Na^+和 Cl^-含量、Na^+/K^+和 Na^+/Ca^{2+}比值均随着培养液中 NaCl 浓度的增加而迅速提高,Na^+、K^+和 Cl^-含量的变化幅度为根系>成熟叶叶鞘>生长叶>成熟叶叶片,玉米幼苗根系最易受外界离子浓度的影响,叶片受外界环境影响较小;各器官中 Ca^{2+}、Mg^{2+}对盐胁迫的响应不一致,NaCl 胁迫使根系中 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量下降,成熟叶叶鞘中 Mg^{2+}含量变化规律性不明显,而 NaCl 胁迫下,成熟叶叶片中 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量增加;玉米幼苗具有拒 Na^+机制,具有一定的耐盐性,它的耐盐性是通过根和成熟叶叶鞘来实现的,Na^+主要贮存在根系和成熟叶叶鞘中,而向成熟叶叶片和生长叶中运输较少;成熟叶叶鞘同时还具有拒 Cl^-能力。

关键词 NaCl 胁迫; 玉米幼苗; 离子含量
中图分类号 S513 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)8-1654-08

Effects of NaCl stress on ion contents in different organs of maize (*Zea mays* L.) seedlings. WANG Yu-feng[1], XUE Ying-wen[1], YANG Ke-jun[1], WANG Qing-xiang[2] ([1] *College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing* 163319, *Heilongjiang, China*; [2] *College of Agronomy; Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110161, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(8): 1654-1661.

Abstract: A water culture experiment was conducted to study the changes of Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, and Cl^- contents in different organs of maize seedlings under NaCl stress. With increasing concentration of NaCl in the medium, the Na^+ and Cl^- contents and Na^+/K^+ and Na^+/Ca^{2+} ratios in different organs of maize seedlings increased rapidly, and the change extent of the Na^+, K^+, and Cl^- contents was in the order of root > mature sheath > young blade > mature blade, suggesting that maize seedling's root was most easily affected by environment ion concentration, while blade was less affected. Under NaCl stress, the Ca^{2+} and Mg^{2+} contents in seedling's root decreased while those in mature blade increased, but the Mg^{2+} content in mature blade sheath had no obvious change. The seedlings had Na^+-exclusion mechanism, presenting definite salt-tolerance. The Na^+ was mainly accumulated in root and mature blade sheath, and less transported to mature and young blades. The mature blade sheath also had Cl^- exclusion capability.

Key words: NaCl stress; maize (*Zea mays* L.) seedling; ion content.

土壤中盐分浓度过高时,盐离子与各种营养元素相互竞争会对植物造成渗透胁迫和干扰营养离子平衡(Ali *et al.*,2001),植物体内营养离子平衡的破坏将影响到正常的生理代谢,因此,维持正常的离子动态平衡对于适应盐生境有着重要的意义(陈少良等,2002)。在盐渍土中尤其以 Na^+和 Cl^-含量最高(王宝山等,1997;Zhu,2001;马文月,2004),由于作物吸收过量 Na^+、Cl^-等离子使 K^+、Ca^{2+}等其他元素的吸收受到抑制,因而 NaCl 胁迫下,许多作物细胞内 K^+和 Ca^{2+}下降,破坏细胞中离子稳态,导致作物缺乏某些元素而引起生长发育障碍(赵可夫,1993;Hasegawa *et al.*,2000)。盐分可通过干扰氮、磷、钾、钙、镁等矿质元素的吸收而表现在整株水平上(Martinez & Lauchli,1994)。在长期盐胁迫下,植物成熟叶吸收并积累盐类加速其死亡(Munns,1993)。一

*教育部高等学校博士学科点专项科研基金新教师类(20102305120002)资助。
**通讯作者 E-mail: wqx10@sina.com
收稿日期: 2011-02-15 接受日期: 2011-04-25

般来说,植物在种子萌发和幼苗生长时期,易遭受盐胁迫伤害(李海云等,2002)。本文以当前大面积栽培的玉米品种"郑单 958"为材料,研究了 NaCl 胁迫下玉米幼苗生长期不同器官中 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Cl^-、Mg^{2+}的吸收及分配的变化趋势,以期对玉米在 NaCl 胁迫下的抗性机理有更深入的认识。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为当前大面积推广的耐盐玉米品种"郑单 958"。

1.2 研究方法

种子用 10% 的 $NaClO_4$ 消毒 10 min,自来水充分冲洗,后用蒸馏水冲洗数遍,28 ℃萌发,挑选发芽一致的种子培养,培养桶外裹双层黑遮光布。水培至一叶一心,后用 1/2 的 Hoagland 营养液培养,人工气候箱培养,昼夜温度分别为 28 ℃和 20 ℃,每天光照 16 h,每 3 d 换一次营养液。幼苗三叶一心时进行如下处理:(1) CK:1/2 Hoagland,(2) 1/2 Hoagland+50 mmol · L^{-1} NaCl;(3) 1/2 Hoagland+100 mmol · L^{-1} NaCl;(4) 1/2 Hoagland+150 mmol · L^{-1} NaCl;(5) 1/2 Hoagland+200 mmol · L^{-1} NaCl,3 次重复。为防止盐冲击,各处理每天递增预定浓度的 1/4,各处理同一天达到预定浓度,此时为胁迫第 1 天。处理期间每 2 d 换一次营养液,营养液 pH = 6.2,全天通气培养。处理 6 d 后采样测定各项指标。

干重及含水量测定:视苗大小每个处理取 7 ~ 10 株,将幼苗分成以下 4 部分:根、生长叶(未展开叶)、成熟叶(完全展开叶)的叶鞘和叶片,迅速用自来水冲洗后,用去离子水冲洗 3 次,用吸水纸吸干,称鲜重,之后在 70 ℃下烘至恒重,称干重,将干材料磨成粉末,用来进行离子含量的测定。

含水量 = (鲜重 - 干重)/鲜重 × 100%

Cl^- 含量测定:按王宝山(1995)第 2 种方法进行提取。参照土壤农化分析(南京农业大学,1994)进行测定。

K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Zn^{2+} 含量测定:用 HNO_3 - $HClO_4$(4 ∶ 1)混合液法消煮,原子吸收法测定。

K^+、Na^+吸收和运输的选择系数的计算:

采用杨敏生等(2003)对根系中 K^+、Na^+、Ca^{2+}向地上部分运输的选择性的计算方法,运输选择系数($S_{K、Na}$运输,$S_{Ca、Na}$运输)的公式如下:

成熟叶叶片:$S_{K、Na运输}$ = (根系 Na^+/K^+)/(成熟叶叶片 Na^+/K^+)

成熟叶叶鞘:$S_{K、Na运输}$ = (根系 Na^+/K^+)/(成熟叶叶鞘 Na^+/K^+)

生长叶:$S_{K、Na运输}$ = (根系 Na^+/K^+)/(生长叶 Na^+/K^+)

成熟叶叶片:$S_{Ca、Na运输}$ = (根系 Na^+/Ca^{2+})/(成熟叶叶片 Na^+/Ca^{2+})

成熟叶叶鞘:$S_{Ca、Na运输}$ = (根系 Na^+/Ca^{2+})/(成熟叶叶鞘 Na^+/Ca^{2+})

生长叶:$S_{Ca、Na运输}$ = (根系 Na^+/Ca^{2+})/(生长叶 Na^+/Ca^{2+})

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对玉米幼苗生长量的影响

玉米幼苗在 NaCl 胁迫下,植株生长瘦弱,老叶萎蔫早衰,且 NaCl 浓度越大越明显。50 mmol · L^{-1} NaCl 处理的玉米幼苗与对照差异不大,每株只有个别老叶失水萎蔫。当 NaCl 浓度达到 200 mmol · L^{-1} 时,处理 6 d 后,叶片出现严重失水现象,老叶干枯,新叶卷曲变黄,个别植株枯萎死亡。

测定结果表明(表 1),50 mmol · L^{-1} NaCl 处理 6 d 后,玉米幼苗成熟叶叶片、成熟叶叶鞘、生长叶干重与对照相比有所下降,但处理间差异未达到显著水平。根系干重增加,方差分析表明,处理间差异达极显著水平。随着NaCl浓度增加玉米幼苗干重

表 1 不同浓度 NaCl 胁迫对玉米幼苗不同部分干重影响

Table 1 Effect of NaCl stress on dry weight of different parts of maize seedlings

NaCl 浓度 (mmol · L^{-1})	根 (g · 株$^{-1}$)	成熟叶叶片 (g · 株$^{-1}$)	成熟叶叶鞘 (g · 株$^{-1}$)	生长叶 (g · 株$^{-1}$)
CK	0.140±0.007 bcB	0.143±0.006 aA	0.069±0.001 aA	0.147±0.003 aA
50	0.159±0.004 aA	0.141±0.004 aA	0.067±0.001 abAB	0.141±0.024 aA
100	0.145±0.001 bB	0.114±0.010 bB	0.065±0.002 bcB	0.110±0.007 bB
150	0.113±0.005 cB	0.087±0.007 cC	0.059±0.001 cB	0.084±0.002 bB
200	0.087±0.005 dC	0.076±0.002 cC	0.049±0.001 dC	0.078±0.007 bB

数据为 3 个重复的平均值(±SE),字母相同者表示差异不显著(大小写字母分别代表 0.01 和 0.05 水平显著)。下同。

表2 不同浓度NaCl胁迫对玉米幼苗不同部分K^+含量的影响
Table 2 Effect of NaCl stress on K^+content of different parts of maize seedlings

NaCl浓度 (mmol·L^{-1})	根 (mg·g^{-1})	成熟叶叶片 (mg·g^{-1})	成熟叶叶鞘 (mg·g^{-1})	生长叶 (mg·g^{-1})
CK	4.30±0.34 aA	7.28±0.18 aA	15.26±0.56 aA	8.52±0.15 aA
50	3.50±0.37 bA	6.01±0.13 bB	10.39±0.18 bB	7.66±0.35 bB
100	2.33±0.18 cB	7.01±0.19 bcB	9.75±0.77 bB	7.45±0.39 bBC
150	1.83±0.04 cdB	6.89±0.08 cB	8.13±0.13 cC	6.66±0.35 cC
200	1.68±0.02 dB	7.72±0.18 dC	7.53±0.18 cC	5.76±0.29 dD

下降最大的器官是生长叶和成熟叶叶片,100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理的成熟叶叶片干重分别是对照的79.7%、60.8%、53.1%,生长叶干重分别为对照的74.8%、57.1%、53.1%。50、100 mmol·L^{-1} NaCl处理根系干重增加,分别为对照的1.14、1.04倍。150、200 mmol·L^{-1}NaCl处理根系干重下降,分别是对照的80.7%、62.2%,表明玉米幼苗地上部更容易受到盐害。本研究中50、100、150 mmol·L^{-1} NaCl处理植株根冠比分别为0.46、0.50、0.49,当NaCl浓度为200 mmol·L^{-1}时,植株根冠比下降为0.43,但仍高于对照(0.39),可能是高盐浓度下玉米幼苗根系受到严重伤害,导致干重迅速下降。

2.2 NaCl胁迫对玉米幼苗各器官含水量的影响

含水量大小可用来表示植株所受的水分胁迫的程度(图1)。不同器官含水量不同,在无盐胁迫或NaCl浓度<100 mmol·L^{-1}情况下,各器官含水量表现为成熟叶叶鞘>生长叶>成熟叶叶片>根系,随NaCl浓度增加,各器官含水量逐渐下降,NaCl浓度为150和200 mmol·L^{-1}时,各器官含水量表现为成熟叶叶鞘>成熟叶叶片>生长叶>根系,含水量下降幅度最大的器官是根系,200 mmol·L^{-1} NaCl处理根系中含水量比对照下降了4.6%;其次是生长叶,比对照下降了3.2%;成熟叶叶鞘和成熟叶叶片分别下降了1.9%和2.3%。

2.3 NaCl胁迫对玉米幼苗K^+含量的影响

玉米幼苗根系、生长叶和成熟叶叶鞘中K^+含量随NaCl浓度增加而降低。下降幅度最大的器官是根系,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理根系中,K^+含量分别为对照的80.2%、56.4%、43.4%、39.7%,对照与处理间差异达显著或极显著水平;其次是成熟叶叶鞘,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理成熟叶叶鞘中K^+含量分别为对照的68.1%、63.9%、52.3%、49.4%,对照与处理间差异达极显著水平,50和100 mmol·L^{-1} NaCl处理间差异不显著,但均与150和200 mmol·L^{-1} NaCl处理间差异达极显著水平;生长叶K^+含量下降幅度较小,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理的生长叶中K^+含量分别为对照的90.0%、87.4%、78.2%、67.7%;随着NaCl浓度浓度的变化,成熟叶叶片中K^+含量并无明显的规律性变化。

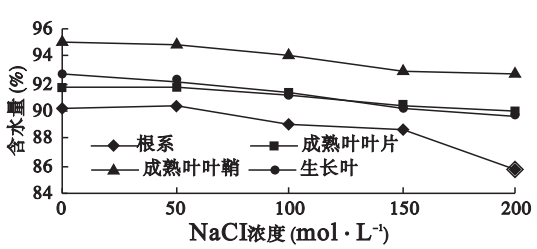


图1 不同浓度NaCl胁迫对玉米幼苗不同部分含水量影响
Fig. 1 Effect of NaCl stress on water content of different parts of maize seedlings

2.4 NaCl胁迫对玉米幼苗Na^+含量的影响

在NaCl胁迫下,玉米幼苗各器官中Na^+浓度顺序为根系>成熟叶叶鞘>生长叶>成熟叶叶片(表3)。随着NaCl处理浓度的增加,Na^+含量在玉米幼苗各器官中逐渐增加,增加幅度最大的器官是根系,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理根系中Na^+含量分别为对照的1.64、2.05、2.46和2.50倍,150、200 mmol·L^{-1} NaCl两个处理的根系中Na^+含量差异不显著,但与其余处理间的差异达极显著水平。其次是成熟叶叶鞘,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理的成熟叶叶鞘中Na^+含量分别为对照的1.15、1.61、2.21、2.42倍,50 mmol·L^{-1} NaCl处理与对照间差异不显著,其余各处理间差异达显著或极显著水平。50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理的生长叶中Na^+含量分别为对照的1.14、1.61、1.90和2.03倍,处理间差异达极显著水平。增加幅度最小的是成熟叶叶片,50和100 mmol·L^{-1} NaCl处理成熟叶叶片的Na^+与对照差异不显著,其中50 mmol·L^{-1} NaCl处理成熟叶叶片的Na^+含量略低于对照,150、200 mmol·L^{-1} NaCl处理的成熟叶叶片的Na^+含量分别为对照的1.26和1.42倍。

表 3 不同浓度 NaCl 胁迫对玉米幼苗不同部分 Na^+ 含量的影响(mg·g^{-1})
Table 3 Effect of NaCl stress on Na^+ content of different parts of maize seedlings

NaCl 浓度(mmol·L^{-1})	根	成熟叶叶片	成熟叶叶鞘	生长叶
CK	4.82±0.11 dD	3.70±0.09 cdC	4.96±0.19 dC	3.57±0.07 eE
50	7.93±0.20 cC	3.59±0.03 dC	5.71±0.21 dC	4.08±0.12 dD
100	9.88±0.10 bB	3.74±0.05 cC	7.99±0.05 cB	5.78±0.09 cC
150	11.86±0.48 aA	4.64±0.11 bB	10.95±0.88 bA	6.80±0.24 bB
200	12.06±0.15 aA	5.23±0.07 aA	12.03±0.51 aA	7.28±0.15 aA

2.5 NaCl 胁迫对玉米幼苗 Mg^{2+} 含量的影响

Mg^{2+} 含量最高的器官是成熟叶叶鞘,含量最低的器官是生长叶(表 4)。在无胁迫的情况下,根系中 Mg^{2+} 含量高于成熟叶叶片;而在 NaCl 胁迫下,成熟叶叶片中含量高于根系,NaCl 浓度越大差值越大。随着 NaCl 浓度的增加,根系中 Mg^{2+} 含量逐渐降低,除 100 与 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理间差异不显著外,其余各处理间差异均达极显著水平;生长叶 Mg^{2+} 含量随着 NaCl 浓度增加而降低,200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的 Mg^{2+} 含量略高于 150 mmol·L^{-1} NaCl 处理,但处理间差异不显著;成熟叶叶片的 Mg^{2+} 含量变化比较特殊,随 NaCl 浓度增加而增加,50 与 100 mmol·L^{-1} NaCl 处理、150 与 200 mmol·L^{-1} NaCl 处理间差异未达显著水平;Mg^{2+} 在成熟叶叶鞘中的分布无明显规律。

2.6 NaCl 胁迫对玉米幼苗 Ca^{2+} 含量的影响

随着 NaCl 浓度增加,根系中 Ca^{2+} 含量逐渐降低,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的根系中 Ca^{2+} 含量分别为对照的 93.7%、84.1%、75.6%、70.8%。150、200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的 Ca^{2+} 含量差异不显著,但与其他处理间差异均达极显著水平。生长叶中的 Ca^{2+} 含量亦随着 NaCl 浓度增加而降低,但对照与 50 mmol·L^{-1} NaCl 处理、100 与 150 mmol·L^{-1} lNaCl 处理的处理间差异未达显著水平。总体上,成熟叶叶鞘中 Ca^{2+} 含量随 NaCl 浓度增加而降低,150 mmol·L^{-1} NaCl 处理的 Ca^{2+} 含量高于 100 mmol·L^{-1} 的 NaCl 处理,但与 100 mmol·L^{-1} NaCl 处理间差异均不显著。成熟叶叶片中 Ca^{2+} 含量变化与其他器官有所不同,随着 NaCl 浓度增大,Ca^{2+} 含量增加(表 5)。

2.7 不同浓度 NaCl 胁迫对玉米幼苗各器官 Cl^- 含量的影响

NaCl 胁迫下,玉米幼苗各器官中的 Cl^- 含量均有明显变化,且变化一致,都表现为 Cl^- 含量随 NaCl 浓度的增加而增加,增加幅度最大的器官是根系,50、100、150、200 mmol·L^{-1} NaCl 处理的根系中 Cl^- 含量分别为对照的 3.20、3.96、5.82、7.68 倍;其次是成熟叶叶鞘,200 mmol·L^{-1} NaCl处理的成熟叶

表 4 不同浓度 NaCl 胁迫对玉米幼苗不同部分 Mg^{2+} 含量的影响(mg·g^{-1})
Table 4 Effect of NaCl stress on Mg^{2+} content of different parts of maize seedlings

NaCl 浓度(mmol·L^{-1})	根	成熟叶叶片	成熟叶叶鞘	生长叶
CK	0.87±0.01 aA	0.71±0.01 cC	1.03±0.08 abA	0.56±0.01 aA
50	0.79±0.02 bB	0.79±0.02 bB	1.03±0.04 abA	0.54±0.01 bB
100	0.71±0.02 cC	0.81±0.01 bB	1.04±0.03 aA	0.53±0.01 cC
150	0.69±0.02 cC	0.86±0.01 aA	1.05±0.02 aA	0.51±0.01 dD
200	0.64±0.01 dD	0.88±0.01 aA	0.94±0.04 bA	0.52±0.01 dCD

表 5 不同浓度 NaCl 胁迫对玉米幼苗不同部分 Ca^{2+} 含量的影响(mg·g^{-1})
Table 5 Effect of NaCl stress on Ca^{2+} content of different parts of maize seedlings

NaCl 浓度(mmol·L^{-1})	根	成熟叶叶片	成熟叶叶鞘	生长叶
CK	0.76±0.020 aA	0.95±0.03 abAB	1.04±0.03 aA	0.40±0.01 aA
50	0.71±0.022 bB	0.89±0.03 bB	0.98±0.06 abAB	0.39±0.01 aA
100	0.64±0.0065 cC	0.94±0.01 abAB	0.92±0.01 bcB	0.36±0.01 bB
150	0.55±0.01 dD	1.03±0.09 aA	0.94±0.02 cB	0.35±0.01 bBC
200	0.54±0.0106 dD	1.02±0.03 aA	0.83±0.02 dC	0.33±0.01 cC

表6 不同浓度NaCl胁迫对玉米幼苗不同部分Cl^-含量的影响($mg \cdot g^{-1}$)
Table 6 Effect of NaCl stress on Cl^- content of different parts of maize seedlings

NaCl浓度($mmol \cdot L^{-1}$)	根	成熟叶叶片	成熟叶叶鞘	生长叶
CK	5.30±0.60 eE	15.66±0.55 eE	9.23±0.76 eE	10.05±1.60 eE
50	16.94±0.31 dD	24.65±0.79 dD	24.38±0.57 dD	26.79±0.49 dD
100	20.99±0.65 cC	34.18±0.80 cC	37.13±0.87 cC	33.95±0.95 cC
150	30.87±0.57 bB	45.33±1.21 bB	53.94±0.75 bB	42.15±0.91 bB
200	40.73±1.27 aA	53.84±0.90 aA	63.74±0.19 aA	45.12±1.15 aA

叶鞘中Cl^-含量为对照的6.91倍。成熟叶叶片和生长叶Cl^-含量均在200 mmol·L^{-1} NaCl胁迫下达到最大值,分别为对照的3.44倍和4.49倍(表6)。

2.8 不同浓度NaCl胁迫对玉米幼苗各器官Na^+/K^+、Na^+/Ca^{2+}比值的影响

Na^+/K^+值常被用来表示盐害程度,比值越大,Na^+抑制对K^+吸收的作用越大,受害越严重,反之则受害轻。NaCl胁迫使玉米幼苗各器官的Na^+/K^+比值增加,根系中的Na^+含量始终高于K^+含量,对照中的Na^+/K^+比值为1.21,随着NaCl浓度的增加,根系中的Na^+/K^+比值迅速增加,在NaCl浓度为200 mmol·L^{-1}时达到最大值,为对照的6.06倍。随着NaCl浓度的增加,成熟叶叶鞘和生长叶中的Na^+/K^+比值增加,成熟叶叶鞘和生长叶的Na^+/K^+比值在NaCl浓度为200 mmol·L^{-1}时达到最大值,分别为对照的4.91和2.91倍。在NaCl浓度低于100 mmol·L^{-1}时,成熟叶叶片中Na^+/K^+比值始终<1,即:K^+含量高于Na^+含量。随着NaCl浓度的增加,成熟叶叶片中Na^+/K^+比值有所增加,在NaCl浓度为150 mmol·L^{-1}时达到最大值,为对照的1.36倍,NaCl浓度为200 mmol·L^{-1}时,成熟叶叶片中Na^+/K^+比值略有降低,为对照的1.35倍(图2)。

NaCl胁迫使玉米幼苗各器官中的Na^+/Ca^{2+}比值升高。Na^+/Ca^{2+}比值增加幅度最大的器官是根系,200 mmol·L^{-1} NaCl处理的根系中Na^+/Ca^{2+}比为对照的3.54倍;其次是成熟叶叶鞘,为对照的3.03倍。200 mmol·L^{-1}NaCl处理的生长叶中Na^+/Ca^{2+}比为对照的2.51倍,成熟叶叶片中Na^+/Ca^{2+}比值增长幅度较小,为对照的1.32倍(图2)。

2.9 不同浓度NaCl胁迫对玉米幼苗各器官离子运输选择性的影响

$S_{K,Na}$和$S_{Ca,Na}$值反映的是植物根中的Na^+、K^+和Ca^{2+}向地上部分运输的选择性。$S_{K,Na}$和$S_{Ca,Na}$值越大,K^+和Ca^{2+}运输的选择性越高,留在根中的Na^+越多。从表7可以看出,不同器官的$S_{K,Na}$值不同,随

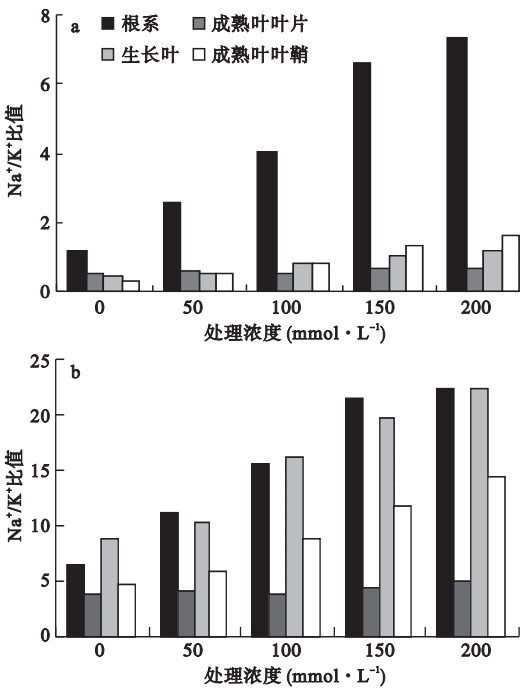


图2 不同浓度NaCl胁迫对玉米幼苗各器官Na^+/K^+(a)和Na^+/Ca^{2+}(b)比值的影响
Fig. 2 Effect of NaCl stress on Na^+/K^+ ratio of different parts of maize seedlings

着NaCl浓度增加,各器官的$S_{K,Na}$值也随之发生变化,在无盐胁迫的情况下,$S_{K,Na}$值表现为成熟叶叶鞘>生长叶>成熟叶叶片,即对K^+、Na^+选择性运输能力最强的器官是成熟叶叶鞘,其次是生长叶,最后是成熟叶叶片。当NaCl浓度为50 mmol·L^{-1}时,$S_{K,Na}$值表现为生长叶>成熟叶叶鞘>成熟叶叶片;当NaCl浓度为100~200 mmol·L^{-1}时,$S_{K,Na}$值表现为成熟叶叶片>生长叶>成熟叶叶鞘。随NaCl浓度增加,成熟叶叶片对K^+、Na^+选择性运输能力逐渐增强,生长叶对K^+、Na^+选择性运输能力在NaCl浓度为150 mmol·L^{-1}时达到最大,随后下降,成熟叶叶鞘对K^+、Na^+选择性运输能力在NaCl浓度为100 mmol·L^{-1}时达到最大,随后下降。如表7所示,NaCl胁迫下玉米幼苗各器官的$S_{Ca,Na}$值增加,对Ca^{2+}选择性最强的器官是成熟叶叶片,其次是成熟

表 7 NaCl 胁迫下离子运输的选择性 $S_{K,Na}$ 的变化
Table 7 Changes in $S_{K,Na}$ of ionic transorption in maize seedlings under NaCl stress

NaCl 浓度 (mmol · L^{-1})	成熟叶叶片	成熟叶叶鞘	生长叶
CK	2.27±0.14 eD	3.55±0.45 bB	2.75±0.31 dC
50	3.97±0.41 dC	4.32±0.54 abAB	4.45±0.40 cB
100	7.85±0.79 cB	5.12±0.8040 aA	5.40±0.65 bAB
150	9.68±0.50 bA	4.84±0.13 aAB	6.38±0.10 aA
200	10.67±0.54 aA	4.53±0.10 aAB	5.73±0.39 abA

表 8 NaCl 胁迫下离子运输的选择性 $S_{Ca,Na}$ 的变化
Table 8 Changes in $S_{Ca,Na}$ of ionic transorption in maize seedlings under NaCl stress

NaCl 浓度 (mmol · L^{-1})	成熟叶叶片	成熟叶叶鞘	生长叶
CK	1.64±0.09 eD	1.33±0.15 cC	0.72±0.03 dC
50	2.7542±0.07 dC	1.9132±0.15 aA	1.07±0.07 abAB
100	3.90±0.12 cB	1.77±0.04 aAB	0.96±0.03 cB
150	4.74±0.32 aA	1.85±0.09 aA	1.09±0.06 aA
200	4.40±0.18 bA	1.54±0.08 bBC	1.01±0.02 bcAB

叶叶鞘,生长叶选择性最低。

结合对各器官 Na^+/K^+ 比值与 Na^+/Ca^{2+} 比值分析可以看出,盐胁迫下成熟叶叶片具有较强的 K^+、Ca^{2+}选择性,Na^+的积累相对较低,从而减轻 Na^+对叶片的伤害,保持较高的 K^+和 Ca^{2+}含量;而生长叶对 K^+的选择性较强,盐胁迫下保持较高的 K^+含量,但其对 Ca^{2+}选择性较弱,可能与生长叶中 Ca^{2+}含量最低有关。

3 讨 论

3.1 NaCl 胁迫对玉米幼苗生长的影响

生长抑制是植物对高盐渍响应最敏感的生理现象(Grundmann,2007),盐渍通过渗透胁迫、离子毒害、离子不平衡或营养缺乏 3 方面降低植物生长或导致植物死亡(侯杰等,2007;Munns 和 Tester,2008;徐猛等,2011)。本试验结果表明,50 mmol · L^{-1} NaCl 处理玉米幼苗干重增加;对各部分的分析表明,地上部干重与对照差异不显著,根系干重明显高于对照,说明玉米根系对盐胁迫具有较强的耐受性。盐胁迫下植物能够通过扩大生长量以平衡盐胁迫对根系吸收功能的损伤(王树凤,2010)。在高浓度 NaCl 胁迫下,玉米幼苗干重显著下降,但不同器官对 NaCl 胁迫的敏感性是不同的,干重下降最大的器官是成熟叶叶片和生长叶,可能是因为盐胁迫抑制了生长叶的生长,同时加速了成熟叶叶片的衰老、死亡和脱落。在低于 150 mmol · L^{-1} NaCl 胁迫下,盐分对玉米苗期地上部分生长的抑制作用大于对根的影响,表现为根系干重下降幅度小于茎叶,根冠比增加。不同器官干重对盐胁迫反应不同,可能与 NaCl 胁迫时的器官生长发育状态有关(王宝山等,2000)。含水量是直接反应盐胁迫对植物造成的渗透胁迫大小的指标,含水量下降植物是在盐胁迫下吸水困难的必然结果。本研究表明,含水量下降最大的器官是根系,其次是生长叶,变化幅度最小的是成熟叶叶鞘,这可能与各器官结构和功能不同,对水分含量的要求不同有关。

3.2 NaCl 胁迫对玉米幼苗各器官离子含量的影响

有研究表明,盐胁迫下,植物膜结构和功能发生变化,细胞内 Na^+过量积累,(张润花等,2006)。Na^+和 K^+的离子半径和水合能相似,具有明显的拮抗效应,Na^+竞争 K^+的吸收位点及活性位点,导致 K^+吸收减少(王素平等,2007)。本试验中,NaCl 胁迫下,玉米幼苗各器官中 Na^+含量显著上升,尤其是根系和成熟叶叶鞘内的 Na^+含量上升的幅度高于生长叶和成熟叶叶片 Na^+上升的幅度(表 3)。玉米幼苗根系和成熟叶叶鞘的 Na^+积累量高于叶片,说明成熟叶叶鞘和根系对于 Na^+的截留能力较强,从而减少了其对叶片代谢的干扰作用,即植株根系吸收盐分后,大部分贮藏在根部和鞘部,不向或少向叶部运输,以减少盐分对叶片的伤害。本研究中,在无胁迫的情况下,成熟叶叶片中 Na^+含量高于生长叶,这可能是由不同器官特性决定的,在 NaCl 胁迫下生长叶中 Na^+含量高于成熟叶叶片,而 Yeo 和 Flowers (1982)认为,盐胁迫下正在发育的幼叶叶片 Na^+含量低,而成熟叶叶片 Na^+含量高,与本研究结果不同。可能是因为生长叶为生长中心,比成熟叶叶片更易受到外界营养供应情况的影响。

本研究表明,盐胁迫下植株体内 K^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}等元素含量下降,根系中 K^+、Ca^{2+}含量下降幅度最大,其次是成熟叶叶鞘,生长叶中下降幅度较小,根系和生长叶中 Mg^{2+}含量随 NaCl 浓度增加,逐渐降低。当作物遭受逆境胁迫时,作物最先感受胁迫的器官是根系,通过根系生长和代谢的相应调整以适应逆境胁迫(李峰等,2004;Jia *et al*, 2008)。而王宝山等(2000)对高粱的研究认为,盐胁迫下生长叶叶片 Ca^{2+}含量下降最明显,其次是其成熟叶叶鞘,与本文研究结果正相反,可能是由于不同作物,及不同耐盐性差异引起的。盐胁迫下植株体内 K^+、Ca^{2+}

和 Mg^{2+} 等元素含量下降可能的原因有:(1) Na^+ 在细胞中的过度积累,将具有稳定和保护质膜作用的 Ca^{2+} 置换掉了,降低膜的选择通透性,直接导致盐离子的大量进入(Rickauer & Tanner,1986),影响钙信号系统的正常发生和传递(Cramer,1985;武维华等,2003);(2)外界高浓度 Na^+ 显著降低了 K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子活度;(3)由于具有高度活性的单价离子(Na^+、Cl^-) 竞争一些必需营养元素(K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等)在膜上的转运位点(Cramer *et al.*,1985)。

盐胁迫下王丽燕和赵可夫(2005)认为,盐分胁迫条件下,玉米根部的 Cl^- 含量明显高于地上部。本研究表明,玉米幼苗根系不具有拒 Cl^- 机制,NaCl 胁迫下,叶片和成熟叶叶鞘中 Cl^- 含量均显著高于根中,与王宝山等(2000)研究结果一致,与王丽燕和赵可夫(2005)研究结果相反。但本研究中 Cl^- 含量增加幅度最大的器官仍为根系,其次是成熟叶叶鞘,增加幅度最小的是成熟叶叶片。在无胁迫的情况下,以成熟叶叶片中 Cl^- 含量最高,其次是生长叶叶片,100 ~ 200 mmol · L^{-1} NaCl 处理成熟叶叶鞘中 Cl^- 含量高于其他器官,说明成熟叶叶鞘不仅可以作为 NaCl 胁迫下的 Na^+ 库,同时也可以作为 Cl^- 库,暂时储藏 Na^+ 和 Cl^-,以保持叶片细胞相对低的 Na^+ 和 Cl^-。本研究中各器官的 K^+、Na^+ 含量易受外界 NaCl 浓度的影响,其次是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}。随 NaCl 浓度变化,离子含量变化最大的器官是根系,其次是成熟叶叶鞘,成熟叶叶片变化最小,根系和叶鞘对有毒的 Na^+ 和 Cl^- 有较强的截留能力,从而保持叶片中相对稳定的离子环境,是玉米幼苗耐盐性的一个重要方面。

3.3 NaCl 胁迫下玉米幼苗各器官对 Ca^{2+} 和 K^+ 选择运输的变化

植物的正常生长发育需要维持细胞内离子的相对平衡状态,而细胞质保持相对恒定的 K^+/Na^+ 的能力是植物盐适应性的重要决定因素之一(高永生等,2003)。盐胁迫下,细胞内离子平衡破坏的一个典型指标就是 Na^+/Ca^{2+} 与 Na^+/K^+ 比值升高,因为盐胁迫严重地影响 Ca^{2+}、K^+ 的吸收及运输。盐胁迫下,Na^+/Ca^{2+} 与 Na^+/K^+ 比值变化幅度为根系>成熟叶叶鞘>生长叶>成熟叶叶片。随 NaCl 浓度增加成熟叶叶片对 K^+、Ca^{2+} 的选择性增加;生长叶中 $S_{K,Na}$ 随 NaCl 浓度增加,呈先增加后降低趋势,高浓度 NaCl 胁迫在一定程度上降低了生长叶对 K^+ 选择性运输。玉米幼苗叶片维持较低的 Na^+/K^+ 比率和较强的 K^+ 选择运输能力对于减少盐分对玉米幼苗的伤害、提高玉米幼苗对盐胁迫的适应性具有重要意义。

参考文献

陈少良,李金克,尹伟伦,等. 2002. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化. 北京林业大学学报,**24**(5/6):84-88.

高永生,王锁民,宫海军,等. 2003. 盐胁迫下植物离子转运的分子生物学研究. 草业学报,**12**(5):18-25.

侯 杰,刘 玲,王景艳,等. 2007. 硝态氮对海水胁迫下长春花幼苗光合特性及离子含量的影响. 西北植物学报,**27**(12):2540-2544.

李 锋,李木英,潘晓华,等. 2004. 不同水稻品种幼苗适应低磷胁迫的根系生理生化特性. 中国水稻科学,18(1):48-52

李海云,赵可夫,王秀峰. 2002. 盐对盐生植物种子萌发的抑制. 山东农业大学学报(自然科学版),**33**(2):170-173.

马文月. 2004. 植物抗盐性研究进展. 农业与技术,**24**(4):95-99.

南京农业大学. 1994. 土壤农化分析. 北京:农业出版社出版:132-133.

王宝山,赵可夫,邹 琦. 1997. 作物耐盐机理研究进展及提高作物抗盐性的对策. 植物学通报,**14**(增刊):25-30.

王宝山,邹 琦,赵可夫. 2000. NaCl 胁迫对高粱不同器官离子含量的影响. 作物学报,**6**(11):845-850.

王宝山. 1995. 小麦叶片中 Na^+、K^+ 提取方法的比较. 植物生理学通讯,**31**(1):50-52.

王丽燕,赵可夫. 2005. 玉米幼苗对盐胁迫的生理响应. 作物学报,**31**(2):264-266.

王树凤,胡韵雪,李志兰,等. 2010. 盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿质离子吸收、运输和分配的影响,生态学报,**30**(17):4609-4616.

王素平,郭世荣,胡晓辉,等. 2007. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗体内 K^+、Na^+ 和 Cl^- 分布的影响. 生态学杂志,**26**(3):348-354.

武维华,张蜀秋,袁 明,等. 2003. 植物生理学. 北京:科学出版社.

徐 猛,马巧荣,张继涛,等. 2011. 盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应. 生态学报,**31**(3):784-792.

杨敏生,李艳华,梁海永,等. 2003. 盐胁迫下白杨无性系苗木体内离子分配及比较. 生态学报,**23**(2):271-277.

张润花,郭世荣,樊怀福,等. 2006. 外源亚精胺对盐胁迫下黄瓜幼苗体内抗氧化酶活性的影响. 生态学杂志,**25**(11):1333-1337.

赵可夫. 1993. 盐生植物的抗盐性及抗盐机理// 植物抗盐生理. 北京:中国科学技术出版社.

Ali H, Tucher TC, Thompson TL, *et al*. 2001. Effects of salinity and mixed ammonium and nitrate nutrition on the growth and nitrogen utilization of Barley. *Journal of Agronomy and*

Crop Science, **186**: 223-228.

Cramer GR, Lauchli A, Polito VS. 1985. Displacement of Ca^{2+} by Na^{+} from the plasmalemma of root cells. *Plant Physiology*, **79**: 207-211.

Grundmann O, Nakajima JI, Seo S, *et al*. 2007. Anti-anxiety effects of *Apocynum venetum* L. in the elevated plus maze test. *Journal of Ethnopharmacology*, **110**: 406-411.

Hasegawa PM, Bressan RA, Zhu JK, *et al*. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **51**: 463-499.

Jia YB, Yang XE, Feng Y, *et al*. 2008. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency. *Journal of Zhejiang University*: *Science B*, **9**: 427-434.

Martinez V, Lauchli A. 1994. Salt-induced inhibition of phosphate uptake in plants of cotton (*Gossypium hirsuturm* L.). *New Phytologist*, **126**: 609-614.

Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, **59**: 651-681.

Munns R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: Some dogmas hypotheses. *Plant, Cell and Environment*, **16**: 15-24.

Rickauer M, Tanner W. 1986. Effects of Ca^{2+} on amino acid transport and accumulation in roots of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiology* **82**: 41-46.

Yeo AR, Flowers TJ. 1982. Accumulation and localization of sodium ions within the shoots of rice (*Oryza sativa*) varieties differing in salinity resistance. *Physiologia Plantarum*, **56**: 343-348.

Zhu JK. 2001. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, **6**: 66-71.

作者简介 王玉凤,女,1978 年生,讲师。主要从事作物栽培方面研究。E-mail: wyf0811@ yahoo. com. cn

责任编辑 李凤芹