

盐胁迫对小粒大豆幼苗生长发育及光合特性的影响

刘玉兰,陈殿元,元明浩,段开怀,李 皖,张国印,孙堂玉

(吉林农业科技学院 植物科学学院,吉林 吉林 132101)

摘 要:本文研究了不同盐($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4=1:1$ 和 $\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3=1:1$)胁迫对小粒大豆东农 690 植株生长发育及光合特性的影响。结果表明:低浓度的中性盐对小粒豆生长具有一定的促进作用,低浓度的碱性盐对小粒豆生长抑制作用不明显;较高浓度盐胁迫抑制小粒豆生长。在两种盐浓度高于 $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫条件下,植株的生长发育及光合特性大幅改变,与对照相比差异极显著。小粒豆株高、根长、根瘤菌数、单株叶面积、鲜比、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)、气孔限制值(L_s)各值与两种盐胁迫均呈极显著负相关;叶绿素含量与中性盐胁迫呈显著负相关,与碱性盐胁迫呈极显著负相关;叶片外浸液相对电导率、胞间 CO_2 浓度(C_i)与两种盐胁迫均呈极显著正相关。
关键词:小粒大豆;盐胁迫;生长;光合特性
中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.06.0913

Effects of Salt Stress on Seedling Growth and Photosynthetic Characteristics of *Glycine gracilis*

LIU Yu-lan, CHEN Dian-yuan, YUAN Ming-hao, DUAN Kai-huai, LI Wan, ZHANG Guo-yin, SUN Tang-yu
(School of Plant Science, Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China)

Abstract: This study examined the effects of various salt stresses ($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4=1:1$ 和 $\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3=1:1$) on the plant growth and photosynthetic characteristics of small soybean variety Dongnong 690. The result showed that the low concentration of neutral salt accelerated the growth of *Glycine gracilis* to a certain extent, while alkaline salt didn't induce obvious resistance, the high concentration of salt stress restrained the growth of *Glycine gracilis*. Under the condition of two kinds salt concentration higher than $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ stress, compared with the control, the growth and photosynthetic characteristic of plant changed significantly. Each value of root length, root nodule bacteria number, leaf area, fresh and dry ratio, net photosynthetic rate(P_n), stomatal conductance(G_s), transpiration rate(Tr), and stomatal limitation value(L_s) of small soybean were significantly negatively correlated with two kinds of salt stress. Chlorophyll content was negatively correlated with neutral salt stress and negatively correlated with alkaline salt stress. Leaf extracts relative conductivity and intercellular CO_2 concentration (C_i) were significantly and positively correlated with two kinds of salt stress.
Keywords: *Glycine gracilis*; Salt stress; Growth; Photosynthetic characteristics

土壤盐碱化严重制约着农业的发展,影响作物生长进程和产量水平,大大限制了盐渍化土壤的快速改良和有效利用^[1]。盐胁迫是目前制约农作物产量的主要逆境因素之一^[2]。盐胁迫既可以直接影响作物的生长发育,也可以间接通过光合作用而影响其生长,且盐浓度越大作用时间越长,影响越明显^[3-6]。光合作用是植物进行生命活动的唯一能量来源。在众多被盐胁迫影响的代谢中,光合作用被认为是对盐逆境胁迫最为敏感的生理过程^[7]。

小粒大豆(*Glycine gracilis*)一般指百粒重为 6 ~ 12 g 的大豆^[8],作为大豆芽专用品种,具有蛋白质

含量高、籽粒小、营养成分丰富等特点,是生产豆芽的主要原料,是出口创汇、增加经济效益的特用品种^[9]。我国推广的小粒大豆品种大多数是由栽培大粒大豆(*Glycine max*)品种和野生大豆(*Glycine soja*)杂交培育出来的。因此,小粒大豆能够保持野生种的某些优良品质,抗逆性较强^[10]。孙广玉等^[11]研究表明小粒大豆与普通栽培大豆比较,对水分胁迫和温度有着较强的适应性,抗逆能力亦强。季平等^[12]研究表明,不同类型盐碱胁迫下大豆的株高、茎粗以及叶片和荚果的干重均显著下降,且叶片和荚果干重下降的幅度较大。曹保华^[13]研究显示在

收稿日期:2017-07-09
基金项目:吉林省财政厅—吉林省省级粮食生产发展专项资金(科研育种项目);吉林农业科技学院作物遗传育种—校级重点学科(112012015001)。
第一作者简介:刘玉兰(1971—),女,硕士,高级实验师,主要从事作物栽培及良种繁育研究。E-mail: jillyl2006@163.com。
通讯作者:陈殿元(1963—),男,硕士,教授,主要从事作物栽培与育种研究。E-mail: JLCdy@sina.com。

NaCl 胁迫下,随着浓度的增加,大豆叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量、净光合速率、气孔导度等均呈下降趋势。这些光合参数的下降幅度与物种本身对盐碱环境的适应能力成负相关,在不耐盐碱的品种中降低趋势更为明显。不同种豆科植物的耐盐性有差异,与物种本身生理特性有关,同时也与盐分类型有关,一般碱性盐对种子萌发的抑制效应要大于中性盐^[14-15]。即使同一物种的不同种群、不同生育期对盐碱环境的抵御能力也存在很大的差异^[16]。目前,关于大豆盐胁迫研究大多集中在野生大豆和普通栽培大豆品种上^[17-19],对盐胁迫条件下小粒豆生长发育及光合特性研究鲜见报道。

本试验以东北主推芽用小粒大豆东农 690 品种为材料,研究不同盐浓度处理对小粒大豆幼苗生长发育及光合特性的影响,试图探讨小粒大豆的耐盐能力,以及小粒大豆在盐碱地的应用的可能性,为盐渍化土地的有效开发利用奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试品种为东农 690,由哈尔滨农业科学院提供。将小粒大豆种子种植于直径 20 cm 花盆内,采用营养土栽培,花盆放置在室外。出苗后,每盆定苗 6 株。根据生长状况正常管理。

1.2 试验设计

将中性盐(NaCl: Na₂SO₄ = 1:1)和碱性盐(NaHCO₃: Na₂CO₃ = 1:1) 分别设置 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 mmol·L⁻¹ 7 个浓度处理,待第三片复叶完全展开后,每处理选取植株生长健壮且生长状况基本相同的 3 盆苗进行盐溶液浇灌,每天 18:00 时每盆浇灌 500 mL 盐溶液。每处理 3 次重复,盐胁迫期间进行人工遮雨。对照组浇清水。处理 7 d 后开始进行生长方面及光合特性等指标的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长性状 处理 7 d 后,将每盆小粒大豆用自来水冲洗干净后再用蒸馏水冲洗,先测定株高、根长、根瘤菌数、鲜重,然后立即在 105℃ 下烘干 15 min 杀青,然后在 80℃ 烘箱中烘至恒重,称重,计算干鲜比。

1.3.2 叶片叶绿素含量 盐胁迫处理 7 d 后,选择晴好无风天气,在 9:00 - 11:00,用手持便携式 SPAD - 502 型叶绿素仪(Minolta Camem 公司,日本)测定 SPAD 值,每个处理测定 3 株,夹取第三个复叶中

间小叶片,测其叶绿素含量。

1.3.3 单株叶面积的测定 将所取样品植株叶片摘下,铺在透明板上压平,用 WY-2000 叶面积仪(上海威野仪器公司)测其单株叶面积。

1.3.4 叶片外浸液相对电导率 叶片外浸液相对电导率用雷磁 DDBJ-350 便携式电导率仪(双旭电子有限公司)按照张治安等^[20]方法测定。

1.3.5 光合特性指标 盐胁迫处理 7 d 后,用 Li-6400(Li-cor 公司)便携式光合仪对小粒豆进行光合生理指标的测定。采用固定红蓝光源进行试验,光强为 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹,为避免测定时环境 CO₂ 浓度的变化对测定结果的干扰,将仪器的进气口与装有恒定 CO₂ 浓度的钢瓶相接,钢瓶 CO₂ 浓度配制成 370 μmol·mol⁻¹,温度设定为 25℃。各处理选取 3 株大豆,在主茎的第三个复叶中间小叶片上测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)等光合生理指标。气孔限制值(L_s) = 1 - C_i/C_a, C_a 为仪器进气口 CO₂ 浓度。

1.4 数据分析

数据统计采用 Excel 2007 软件分析,方差分析利用 DPS 7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度盐胁迫对小粒豆生长的影响

2.1.1 小粒豆植株生长性状的变化 根长、株高和根瘤菌数是植物体经胁迫后,外在直观的体现影响程度的生理指标。尤其是根最先感知胁迫信息,并逐级向地上部分传递,进而对地上生长产生影响^[21]。株高是描述植物体生长状况的一个特征量,是盐胁迫后植株的最直观表量因子。随中性盐胁迫浓度的升高小粒大豆幼苗株高呈下降的趋势,在浓度为 140 mmol·L⁻¹ 达到最低值,比对照组降低 20.59%(表 1);碱性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗株高呈先降低再升高再降低的趋势,在 40 mmol·L⁻¹ 时达到最高值,但与对照组差异不显著,随着胁迫浓度的继续升高株高降低,在 140 mmol·L⁻¹ 达到最低,比对照组降低 15.81% (y_{neutral} = -0.034x + 27.571, R² = 0.849; y_{alkaline} = -0.037x + 27.209, R² = 0.984, 表 2)。相关性分析显示小粒大豆幼苗株高与两种不同类型盐胁迫均呈极显著负相关(r_{neutral} = -0.992, P < 0.01; r_{alkaline} = -0.921, P < 0.01, 表 3)。

在中性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗根长随胁

迫浓度的升高呈现先升高后降低的趋势。在浓度为 20 mmol·L⁻¹时根长最长,极显著高于其它各处理(表 1);碱性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗根长呈随胁迫浓度的升高而降低的趋势(表 2)。碱性盐胁迫下的根长显著低于中性盐胁迫处理组,说明碱性盐胁迫对根长的影响比中性盐胁迫显著($y_{\text{neutral}} = -0.041x + 25.026, R^2 = 0.858$; $y_{\text{alkaline}} = -0.041x + 24.048, R^2 = 0.989$)。通过相关性分析可知小粒大豆幼苗根长与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.926, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = -0.994, P < 0.01$,表 3)。

在中性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗根瘤菌数随胁迫浓度的升高呈现先升高后降低的趋势,在浓度为 20 mmol·L⁻¹时根瘤菌数最多,极显著高于其它各处理。碱性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗根瘤菌数随胁迫浓度的升高呈降低的趋势。两种盐在浓度为 140 mmol·L⁻¹时均达到最低值,中性盐比对照组降低了 22.8%,碱性盐比对照组降低了 39.8%,碱性盐胁迫下的根瘤菌数显著低于中性盐胁迫处理组,说明碱性盐胁迫对根瘤菌的抑制作用比中性盐胁迫显著($y_{\text{neutral}} = -0.039x + 21.517, R^2 = 0.904$; $y_{\text{alkaline}} = -0.061x + 20.117, R^2 = 0.904$,表 1 和表 2)。通过相关性分析可知小粒大豆幼苗根瘤菌数与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.951, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = -0.951, P < 0.01$,表 3)。

表 1 中性盐胁迫对小粒豆生长性状的影响
Table 1 Effects of neutral salt stress on growth traits of *Glycine gracilis*

中性盐浓度	株高	根长	根瘤菌数
Concentration of neutral salt/(mmol·L ⁻¹)	Plant height /cm	Root length /cm	Rhizobium number /个
CK	27.2 aA	23.8 bB	20.6 bB
20	26.4 abAB	25.8 aA	22.0 aA
40	25.6 bcBC	23.1 cBC	20.1 bB
60	25.0 cdCD	22.8 cCD	18.8 cC
80	24.5 deCD	22.1 dD	18.1 dCD
100	23.8 eDE	20.4 eE	17.7 deDE
120	23.0 fE	19.9 eE	17.1 eE
140	21.6 gF	19.5 fE	15.9 fF

同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$),下同。
Different capital after the same column data mean significant difference ($P < 0.05$) and different capital mean very significant difference ($P < 0.01$), the same as below.

表 2 碱性盐胁迫对小粒豆生长性状的影响
Table 2 Effects of alkaline salt stress on growth traits of *Glycine gracilis*

碱性盐浓度	株高	根长	根瘤菌数
Concentration of alkaline salt/(mmol·L ⁻¹)	Plant height /cm	Root length /cm	Rhizobium number /个
CK	27.2 abA	23.8 aA	20.6 aA
20	26.8 bA	23.0 bAB	18.2 bB
40	27.7 aA	22.7 bB	19.4 cC
60	24.6 cA	21.8 cC	15.2 dD
80	24.5 cdA	20.9 dD	14.8 dD
100	24.1 cdA	19.8 eE	13.4 eE
120	23.7 dAC	19.1 fE	13.0 eEF
140	22.9 cC	18.1 gF	12.4 fF

表 3 两种盐胁迫与小粒大豆幼苗生长性状的相关性分析
Table 3 Correlation analysis between two kinds of salt stress and growth characters of *Glycine gracilis* seedlings

处理	株高	根长	根瘤菌数
Treatment	Plant height /cm	Root length /cm	Rhizobium number /个
中性盐 Neutral salt	-0.992 **	-0.926 **	-0.951 **
碱性盐 Alkaline salt	-0.921 **	-0.994 **	-0.951 **

* 代表数值呈显著相关 ($P < 0.05$), ** 代表数值呈极显著相关 ($P < 0.01$),下同。
* represent the values were significant correlated ($P < 0.05$), and ** represent the values were extremely significant correlated ($P < 0.01$), the same as below.

2.1.2 小粒豆植株单株叶面积、叶绿色含量、干鲜比、相对电导率的变化 在中性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗单株叶面积呈现随胁迫浓度的升高先升高后降低的趋势。在浓度为 40 mmol·L⁻¹时单株叶面积最大,显著高于对照组;碱性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗单株叶面积呈随胁迫浓度的升高降低的趋势,两种盐在浓度为 140 mmol·L⁻¹时均达到最低值,中性盐比对照组降低 29.4%,碱性盐比对照组降低 34.5% ($y_{\text{neutral}} = -0.437x + 187.161, R^2 = 0.896$; $y_{\text{alkaline}} = -0.465x + 179.999, R^2 = 0.980$,表 4 和表 5)。通过相关性分析可知小粒大豆幼苗单株叶面积与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.947, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = -0.990, P < 0.01$,表 6)。

叶绿素含量是作物光合特性的重要量度,能够直接影响碳水化合物的合成,它是反映叶片质量的主要指标之一^[22]。在中性盐胁迫处理下,小粒大豆

幼苗叶绿素含量随胁迫浓度的升高呈现先升高后低的趋势。在浓度为 40 mmol·L⁻¹时叶绿素含量最高,极显著高于对照组;碱性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗叶绿素含量随胁迫浓度的升高呈先升高后降低的趋势,在浓度为 20 mmol·L⁻¹时叶绿素含量最高,显著高于对照组 ($y_{\text{neutral}} = -0.0327x + 39.905, R^2 = 0.707; y_{\text{alkaline}} = -0.040x + 39.375, R^2 = 0.885$,表4和表5)。通过相关性分析可知小粒大豆幼苗叶绿素含量与中性盐胁迫呈显著负相关,与碱性盐胁迫呈极显著负相关 ($r_{\text{neutral}} = -0.841, P < 0.05; r_{\text{alkaline}} = -0.941, P < 0.01$,表6)。

干鲜比是干物质积累性能的体现,揭示了干物质积累情况,反映干物质的积累程度。在中性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗干鲜比随胁迫强度的增强呈现先升高后降低的趋势。在浓度为 20 mmol·L⁻¹时干鲜比最高,碱性盐胁迫处理下,小粒大豆幼苗干鲜比呈现随胁迫强度增加逐渐降低趋势,两种盐在浓度为 140 mmol·L⁻¹时均达到最低值,中性盐比

对照组降低了 20.0%,碱性盐比对照组降低了 28.0%,碱性盐胁迫下的干鲜比显著低于中性盐胁迫处理组,说明碱性盐胁迫对小粒大豆干物质积累的抑制作用强于中性盐胁迫 ($y_{\text{neutral}} = -0.0003x + 0.257, R^2 = 0.888; y_{\text{alkaline}} = -0.0005x + 0.248, R^2 = 0.993$,表4和表5)。通过相关性分析可知小粒大豆干鲜比与两种盐胁迫均呈极显著负相关 ($r_{\text{neutral}} = -0.942, P < 0.01; r_{\text{alkaline}} = -0.997, P < 0.01$,表6)。

两种盐胁迫对小粒大豆幼苗叶片外浸液相对电导率的影响总体上都呈现随着胁迫强度的增加逐渐升高的趋势,在浓度为 140 mmol·L⁻¹时叶片外浸液相对电导率最高,中性盐比对照组提高 71.4%,碱性盐比对照组提高 78.6% ($y_{\text{neutral}} = 0.0012x + 0.3081, R^2 = 0.951; y_{\text{alkaline}} = 0.0014x + 0.3067, R^2 = 0.971$,表4和表5)。通过相关性分析可知小粒大豆幼苗叶片外浸液相对电导率与两种盐胁迫均呈极显著正相关 ($r_{\text{neutral}} = 0.975, P < 0.01; r_{\text{alkaline}} = 0.986, P < 0.01$,表6)。

表4 中性盐对小粒豆单株叶面积、叶片叶绿素含量、干鲜比、相对电导率的影响

Table 4 Effect of neutral salt on single leaf area, chlorophyll value, DW/FW and relative conductivity of *Glycine gracilis*

中性盐浓度 Concentration of neutral salt/(mmol·L ⁻¹)	单株叶面积 Single leaf area/cm ²	叶绿素含量 Chlorophyll content	干鲜比 DW/FW ratio	相对电导率 Relative conductivity
CK	175.0 bA	38.2 bBC	0.25 abAB	0.28 fE
20	178.5 abA	39.8 aAB	0.26 aA	0.34 eD
40	180.1 aA	40.5 aA	0.24 abcABC	0.36 deCD
60	169.5 cB	37.8 bC	0.23 bcdABC	0.39 cdBCD
80	154.0 dC	37.1 bcCD	0.23 bcdBC	0.41 bcABC
100	140.5 eD	36.9 bcCD	0.23 cdbcd	0.44 abAB
120	130.8 fE	35.8 cdDE	0.22 deCD	0.44 abAB
140	123.6 gF	34.9 dE	0.20 eD	0.46 aA

表5 碱性盐对小粒豆单株叶面积、叶片叶绿素含量、干鲜比、相对电导率的影响

Table 5 Effect of alkaline salt on single leaf area, chlorophyll value, DW/FW and relative conductivity of *Glycine gracilis*

碱性盐浓度 Concentration of alkaline salt/(mmol·L ⁻¹)	单株叶面积 Single leaf area/cm ²	叶绿素含量 Chlorophyll content	干鲜比 DW/FW ratio	相对电导率 Relative conductivity
CK	175.0 aA	38.1 bAB	0.25 aA	0.28 gF
20	171.2 abAB	39.4 aA	0.24 abAB	0.35 fE
40	167.9 bB	37.8 bcB	0.23 bcBC	0.37 efDE
60	152.6 cC	37.1 cdBC	0.21 cdCD	0.40 deCD
80	141.9 dD	36.9 dBC	0.21 deCD	0.43 cdBC
100	134.6 eE	35.8 eC	0.19 efDE	0.46 bcAB
120	121.6 fF	34.4 fD	0.19 fE	0.47 abAB
140	114.6 gG	32.9 gE	0.18 fE	0.50 aA

表 6 两种盐胁迫与小粒豆单株叶面积、叶片叶绿素含量、干鲜比、相对电导率的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between two kinds of salt stress and the single leaf area, chlorophyll value, DW/FW and relative conductivity of *Glycine gracilis*

处理 Treatment	单株叶面积 Single leaf area/cm ²	叶绿素含量 Chlorophyll content	干鲜比 DW/FW ratio	相对电导率 Relative conductivity
中性盐 Neutral salt	-0.947 **	-0.841 *	-0.942 **	0.975 **
碱性盐 Alkaline salt	-0.990 **	-0.941 **	-0.997 **	0.986 **

2.2 不同浓度盐胁迫对小粒豆叶片光合特性的影响

2.2.1 净光合速率 (P_n) 的变化 净光合速率 (P_n)是反映植物光合能力的最为重要的指标。中性盐对小粒豆净光合速率的影响是随着盐浓度的增加先升高后降低,盐浓度为 $40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时净光合速率最大,但与对照相比差异不显著,盐浓度 $\geq 60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 净光合速率明显减小($y_{\text{neutral}} = -0.047x + 19.272, R^2 = 0.831$,表 7)。碱性盐对小粒豆净光合速率的影响总体上是随着盐浓度的升高而降低,盐浓度 $\geq 40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 净光合速率明显减小($y_{\text{alkaline}} = -0.074x + 19.441, R^2 = 0.938$,表 8)。在相同盐浓度下,中性盐胁迫处理下的小粒大豆净光合速率要高于碱性盐胁迫处理,说明碱性盐胁迫对小粒大豆净光合速率的抑制作用强于中性盐胁迫处理。通过对两种盐胁迫浓度与净光合速率的相关性分析,发现净光合速率与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.911, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = -0.968, P < 0.01$,表 9)。

2.2.2 气孔导度 (G_s) 的变化 中性盐对小粒豆气孔导度的影响是随着盐浓度的增加先升高后降低,中性盐在浓度为 $40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时气孔导度最大,但与对照相比差异不显著,盐浓度 $\geq 60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 气孔导度明显减小($y_{\text{neutral}} = -0.046x + 19.282, R^2 = 0.879$,表 7)。碱性盐对小粒豆气孔导度的影响是随着盐浓度的升高而降低,盐浓度为 $140\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 气孔导度最小,比对照减小 41.7% ($y_{\text{alkaline}} = -0.074x + 19.441, R^2 = 0.938$,表 8)。在相同盐浓度下碱性盐胁迫对小粒大豆气孔导度的作用强于中性盐胁迫处理。通过对两种盐胁迫浓度与气孔导度的相关性分析发现,气孔导度与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.938, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} =$

$-0.985, P < 0.01$,表 9)。

2.2.3 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的变化 两种盐胁迫对小粒大豆胞间 CO_2 浓度的影响趋于一致,即随胁迫浓度的升高均呈先降低后增高的趋势,在浓度为 $140\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时胞间 CO_2 浓度最高,中性盐比对照组高 29.1% ,碱性盐比对照组高 29.9% ($y_{\text{neutral}} = 0.694x + 266.236, R^2 = 0.917$; $y_{\text{alkaline}} = 0.692x + 269.31, R^2 = 0.952$,表 7 和表 8)。通过相关性分析可知小粒大豆胞间 CO_2 浓度与两种盐胁迫均呈极显著正相关($r_{\text{neutral}} = 0.958, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = 0.976, P < 0.01$,表 9)。

2.2.4 蒸腾速率 (Tr) 的变化 两种盐胁迫对小粒大豆蒸腾速率的影响都呈现随着胁迫强度的增强逐渐降低的趋势。在相同盐浓度下,中性盐胁迫处理的小粒大豆蒸腾速率高于碱性盐胁迫处理,碱性盐胁迫对小粒大豆蒸腾速率的作用强于中性盐胁迫处理 ($y_{\text{neutral}} = -0.012x + 3.885, R^2 = 0.978$; $y_{\text{alkaline}} = -0.011x + 3.476, R^2 = 0.830$,表 7 和表 8)。通过相关性分析可知小粒大豆蒸腾速率与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.989, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = -0.911, P < 0.01$,表 9)。

2.2.5 气孔限制值 (L_s) 的变化 两种盐对小粒豆气孔限制值的影响都是随着盐浓度的增加先升高后降低,中性盐在浓度为 $40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时气孔限制值最大,与对照相比差异显著($y_{\text{neutral}} = -0.002x + 0.280, R^2 = 0.917$,表 7)。碱性盐在浓度为 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时气孔限制值最大,与对照相比差异显著 ($y_{\text{alkaline}} = -0.002x + 0.271, R^2 = 0.952$,表 8)。通过对两种盐胁迫浓度与气孔限制值的相关性分析,发现气孔限制值与两种盐胁迫均呈极显著负相关($r_{\text{neutral}} = -0.958, P < 0.01$; $r_{\text{alkaline}} = -0.976, P < 0.01$,表 9)。

表 7 中性盐胁迫对小粒大豆叶片光合特性的影响

Table 7 Effect of neutral salt stress on photosynthetic characteristics of *Glycine gracilis* leaves

($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

中性盐浓度 Neutral salt concentration /($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	<i>Pn</i>	<i>Gs</i>	<i>Ci</i>	<i>Tr</i>	<i>Ls</i>
CK	18.2 aAB	0.60 abAB	282.8 fF	3.93 aA	0.24 bB
20	18.4 aAB	0.64 abA	276.8 gFG	3.63 bAB	0.25 aAB
40	19.0 aA	0.67 aA	273.5 gG	3.54 cB	0.26 aA
60	16.9 bcBC	0.56 bcABC	308.2 eE	3.08 cC	0.17 cC
80	15.8 cCD	0.46 cdBCD	321.6 dD	2.92 cCD	0.13 dD
100	14.3 dDE	0.43 dCD	336.3 cC	2.67 dDE	0.09 eE
120	13.0 deE	0.40 dD	353.7 bB	2.46 deE	0.04 fF
140	12.8 eE	0.38 dD	365.6 aA	2.38 eE	0.01 gG

表 8 碱性盐胁迫对小粒大豆叶片光合特性的影响

Table 8 Effect of alkaline salt stress on photosynthetic characteristics of *Glycine gracilis* leaves

($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

碱性盐浓度 Concentration of alkaline salt /($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	<i>Pn</i>	<i>Gs</i>	<i>Ci</i>	<i>Tr</i>	<i>Ls</i>
CK	18.2 aA	0.60 aA	282.8 gF	3.93 aA	0.24 bB
20	18.1 aA	0.56 aAB	272.1 hG	3.09 bB	0.26 aA
40	16.8 bcAB	0.55 aAB	288.6 fF	2.78 cBC	0.22 cB
60	15.7 cdBC	0.43 bBC	315.4 eE	2.61 cdC	0.15 dC
80	14.8 dC	0.38 bcCD	327.8 dD	2.58 cdC	0.11 eD
100	12.6 eD	0.35 bcCD	339.7 cC	2.41 dCD	0.08 fE
120	10.1 fE	0.30 cdCD	353.2 bB	2.36 dCD	0.04 gF
140	8.0 gF	0.25 dD	367.4 aA	2.04 eD	0.007 hG

表 9 两种盐胁迫与小粒大豆光合指标的相关性分析

Table 9 Correlation analysis between two kinds of salt stress and photosynthetic characteristics of *Glycine gracilis*

($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

处理 Treatment	<i>Pn</i>	<i>Gs</i>	<i>Ci</i>	<i>Tr</i>	<i>Ls</i>
中性盐 Neutral salt	-0.911 **	-0.938 **	0.958 **	-0.989 **	-0.958 **
碱性盐 Alkaline salt	-0.968 **	-0.985 **	0.976 **	-0.911 **	-0.976 **

3 结论与讨论

3.1 盐胁迫下植株生长方面的变化

盐胁迫是一种非生物胁迫因子,它对植物的伤害体现在多方面,而且没有固定的靶细胞^[23],盐胁迫下植物的生长发育会受到一定程度的影响,植物的代谢能力减弱,光合积累能源物质能力下降。本研究结果表明:在中性盐胁迫下,小粒大豆的株高

呈现随着盐浓度的增加而降低的趋势,但低浓度降低不明显;根长、根瘤菌数、单株叶面积、叶片叶绿素含量、干鲜比则表现出随着盐浓度的增加先升高后降低的趋势。在碱性盐胁迫下,随着盐浓度的增加,小粒大豆的根长、干鲜比均呈现降低的趋势,株高、根瘤菌数表现出随着盐浓度的增加先降低再升高再降低的趋势,单株叶面积、叶片叶绿素含量则呈现出随着盐浓度的增加先升高再降低的趋势,均

表现低浓度下改变不明显。在两种盐浓度为 $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫条件下,植株的生长量积累均大幅下降,与对照相比差异显著。在相同浓度下中性盐胁迫处理小粒大豆各生长量积累要高于碱性盐胁迫处理,说明碱性盐胁迫对小粒大豆生长量积累的抑制作用强于中性盐胁迫处理。小粒豆株高、根长、根瘤菌数、单株叶面积、干鲜比各值与两种盐胁迫均呈极显著负相关,叶绿素含量与中性盐胁迫呈显著负相关,与碱性盐胁迫呈极显著负相关。

作物盐胁迫期间,相对电导率可以反映细胞膜的稳定性^[24]。本研究表明,随着盐浓度的增加叶片外浸液相对电导率呈显著递增趋势,叶片外浸液相对电导率与两种盐胁迫均呈极显著正相关。这说明盐胁迫对小粒豆的细胞膜伤害较大,已经超出其耐受限度,使作物代谢紊乱发生膜脂过氧化,质膜遭到损害^[25]。

从盐胁迫对小粒大豆生长方面的影响看,低浓度的中性盐有一定的促进作用,低浓度的碱性盐的抑制作用不明显;较高浓度盐胁迫有抑制作用。

3.2 盐胁迫对小粒豆叶片光合特性的影响

试验结果表明:在中性盐胁迫下,小粒大豆的净光合速率、气孔导度、气孔限制值均呈现随着盐胁迫强度的增加先升高后降低的趋势,蒸腾速率则呈现降低的趋势。在碱性盐胁迫下,随着盐浓度的增加,小粒大豆的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均呈现降低的趋势,气孔限制值表现出随着盐浓度的增加先升高再降低的趋势,但低浓度的改变不明显。两种盐胁迫下,胞间 CO_2 浓度均呈现先降低后升高趋势,在较高浓度盐胁迫环境下,胞间 CO_2 浓度呈明显升高趋势,而其它光合特性指标显著下降,这表明较高浓度盐胁迫导致净光合速率的降低主要是由非气孔限制因素引起的。在相同盐浓度下中性盐胁迫处理小粒大豆光合特性各值要高于碱性盐胁迫处理,说明碱性盐胁迫对小粒大豆光合特性的抑制作用强于中性盐胁迫处理。两种盐在浓度为 $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫条件下,叶片的光合特性各值均大幅改变,与对照相比差异显著。小粒豆净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值各值与两种盐胁迫浓度均呈极显著负相关,胞间 CO_2 浓度与两种盐胁迫均呈极显著正相关。

从盐胁迫对小粒大豆光合特性的影响看,低浓度的中性盐提高了小粒大豆的净光合速率、气孔导度、气孔限制值,降低了蒸腾速率,能促进小粒豆生长,低浓度的碱性盐对小粒豆光合特性的影响不明显;较高浓度盐胁迫降低小粒豆的净光合速率,从而抑制小粒豆生长。

综上所述,本研究中低浓度中性盐和碱性盐对小粒豆生长及光合特性的影响不同,低浓度的中性盐对小粒生长具有一定的促进作用,低浓度的碱性盐对小粒豆生长抑制作用不明显;较高浓度盐胁迫抑制小粒豆生长,使小粒豆的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值各指标显著下降,胞间 CO_2 浓度明显升高。两种盐在浓度高于 $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫条件下,植株的生长发育及光合特性各值均大幅改变,与对照相比差异极显著,这说明 $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐浓度可能是小粒大豆生长发育、生理及光合盐胁迫的临界盐浓度。小粒豆株高、根长、根瘤菌数、单株叶面积、干鲜比、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值各值与两种盐胁迫均呈极显著负相关;叶绿素含量与中性盐胁迫呈显著负相关,与碱性盐胁迫呈极显著负相关;叶片外浸液相对电导率、胞间 CO_2 浓度与两种盐胁迫均呈极显著正相关。

参考文献

[1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845. (Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.)

[2] 李子芳, 王玉国, 孙守钧. 植物应对盐胁迫的生理机制[J]. 河北农业科学, 2008, 12(3): 1-3. (Li Z F, Wang Y G, Sun S J. The physiological mechanism of plants responding to salt stress [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(3): 1-3.)

[3] Bethke P C, Drew M C. Stomatal and nonstomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of *Captcum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity[J]. Plant Physiology, 1992, 99: 219-226.

[4] Walker R R, Blackmore D H. Carbon dioxide assimilation and foliar ion concentration in leaves of [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] trees irrigated with NaCl and Na_2SO_4 [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1993, 20: 173-85.

[5] Munns R. Physiological processes limiting plant growth in neutral soils: Some dogmas and hypotheses[J]. Plant Cell and Environment, 1993, 16: 15-24.

[6] 张丽辉, 赵驥民, 范亚红. 中性盐胁迫对高粱苗期光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 100-101. (Zhang L H, Zhao Y M, Fan Y H. The physiological mechanism of plants responding to salt stress [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2012, 40(8): 100-101.)

[7] 张丽华, 赵洪祥, 谭国波, 等. 灌溉方式对大豆光合性状及土壤水分利用率的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(4): 613-616. (Zhang L H, Zhao H X, Tan G B, et al. Effects of irrigation modes on photosynthetic characters and water use efficiency of soybean[J]. Soybean Science, 2012, 31(4): 613-616.

[8] 吉林省农科院. 中国大豆育种与栽培[M]. 北京: 农业出版社, 1987: 173-180. (Jilin Provincial Academy of Agricultural Sciences. Soybean Breeding and Cultivation in China[M]. Beijing: